

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**

**Katedra aplikované kybernetiky**

**MATEMATICKÝ MODEL**  
**PNEUMATICKÉ SOUSTAVY**

**MATHEMATICAL MODEL OF**  
**PNEUMATIC SYSTEM**

**Disertační práce**

Vypracoval: Ing. Zdeněk Motl

Školitel: prof. Ing. Miroslav Olehla, CSc.

### **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé doktorské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací se svým školitelem práce.

### **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my dissertation in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my dissertation for the internal purposes of TUL.

If I use my dissertation or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my dissertation to the full amount.

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the dissertation.

Datum / Date: 9.7.2007

Podpis / Signature:

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval panu prof. Ing. Miroslavu Olehlovi, CSc., panu Ing. Martinu Lachmanovi Ph.D., panu Ing. Marcelu Horákovi Ph.D. a panu Ing. Michalu Moučkovi Ph.D. za odbornou pomoc při vypracování této práce. Dále děkuji rodičům a celé rodině za finanční a duševní podporu. Rád bych také poděkoval přátelům a kolegům za obětavý přístup v době sepisování a kompletování této práce.

## Anotace

Disertační práce se zabývá problematikou matematického modelování a simulací chování pneumatických mechanismů. Je zde odvozen matematický model pneumatické soustavy jejímiž hlavními konstrukčními prvky jsou pneumatická lineární jednotka, pneumatický proporcionální ventil a regulátor koncových poloh. Z odvozených modelů jednotlivých částí jsou sestavena obecná simulační schémata. Pro ověření správnosti a použitelnosti modelů je provedeno vzájemné porovnání nasimulovaných a reálných charakteristik soustavy. Následně byla vytvořena webová aplikace, umožňující provádět simulace prostřednictvím sítě internet. Součástí aplikace je i SVG modul s modelem a jeho submodely. Výstupní data lze získat také prostřednictvím web service.

Odvozený matematický model, a tedy i sestavená simulační schémata jsou použitelná pro další obdobné soustavy a lze je využít pro jejich simulaci. Tím je umožněno navrhovat tyto systémy bez nutnosti jejich fyzické realizace, čímž dochází k snížení celkových nákladů na vývoj. Webovou aplikaci a SVG modul lze použít pro simulování těchto soustav přes webový prohlížeč. Web service lze využít pro zpracovávání výstupních dat bez závislosti na operačním systému a použitém programovacím jazyku.

**Klíčová slova:** pneumatický servopohon, lineární pneumatický pohon, pneumatický ventil

# Annotation

The thesis addresses problems of mathematical modeling and pneumatic mechanism behavior simulation. Further, a mathematical model of pneumatic system, whose main construction elements are pneumatic linear unit, pneumatic proportional valve and end-positions controller, is derived in this thesis. General simulation charts are drawn up based on the derived models of individual parts. In order to verify the accuracy and applicability of the models, a cross comparison of the simulated and realistic characteristics of the system is carried out. Subsequently a web application enabling to carry out simulation through www was created. SVG module with its model and its sub-models are parts of this application. It is also possible to obtain output data through web service.

The derived mathematical model as well as the drawn up simulation charts are also applicable for other similar systems and they can possibly be used for their simulation. This allows us to propose such systems without the necessity of their physical implementation which further results in reducing the overall development expenses. The web application and SVG module can be used to simulate these systems via web browser. The web service can be used for output data processing, independent of the operational system and the program language.

Keywords:                      pneumatic servo drive, linear pneumatic servo drive,  
   pneumatic valve

# OBSAH

1. Úvod.....	10
2. Cíle práce .....	12
3. Současný stav problematiky .....	13
3.1. Pneumatická zařízení .....	13
3.2. Simulační software a animační – kontrolní software.....	14
3.2.1. Integrované prostředí Matlab.....	15
3.2.2. Programové prostředí LabVIEW .....	17
3.2.3. Systém DYNAST .....	19
3.3. Neuniverzálnost vstupů a výstupů současných aplikací .....	21
4. Teoretická část .....	22
4.1. Termomechanické jevy v pneumatických systémech.....	22
4.2. Matematické modely.....	28
4.2.1. Pneumatická lineární jednotka.....	28
4.2.2. Pneumatický servoventil.....	32
4.2.3. Odvození hmotnostního průtoku a průtokové plochy ventilu MPYE ....	33
5. Experimentální část.....	38
5.1. Pneumatický polohový servosystém.....	38
5.2. Popis komponent pneumatického systému .....	40
5.2.1. Lineární pneumatická jednotka DPGL .....	40
5.2.1.1. Identifikace parametrů lineární pneumatické jednotky DGPL .....	41
5.2.1.2. Třecí síly v lineární pneumatické jednotce DGPL.....	42
5.2.2. Proporcionální ventil MPYE .....	46
5.2.2.1. Dynamika pneumatického ventilu .....	47
5.2.2.2. Průtoková plocha ventilu .....	48
5.2.3. Regulátor koncových poloh SPC11 .....	50
5.3. Sestavení simulačního modelu.....	54
5.3.1. Simulační schéma lineární pneumatické jednotky DGPL .....	55
5.3.2. Simulační schéma proporcionálního ventilu MPYE .....	58
5.3.2.1. Simulační schéma subsystému „Dynamika + prutocna plocha“ ....	59
5.3.2.2. Simulační schéma subsystému „Hmotnostni prutok“ .....	63

5.3.3.	Simulační schéma regulátoru koncových poloh SPC11 .....	71
5.3.3.1.	Nalezení konstant regulátoru SPC11 .....	71
5.4.	Souhrn konstant použitých v mat. modelu pneumatického systému .....	74
5.5.	Simulace a měření na pneumatickém polohovém servosystému.....	75
5.5.1.	Přesnost polohování .....	76
5.5.2.	Vliv změny externích parametrů soustavy.....	78
5.5.2.1.	Změna zátěžné hmotnosti $m_Z$ .....	78
5.5.2.2.	Změna velikosti externí zátěžné síly $F_Z$ .....	80
6.	Prezentace a sdílení výsledků .....	83
6.1.	Webová aplikace .....	83
6.1.1.	Volba technologie .....	83
6.1.2.	Architektura aplikace .....	84
6.1.2.1.	Princip MVC.....	84
6.1.2.2.	Diagram tříd .....	86
6.1.2.3.	Analytický model aplikace .....	89
6.2.	Webová služba (web service) .....	91
7.	Závěr .....	92
8.	Literatura.....	95
9.	www odkazy .....	97
10.	Publikace autora.....	98
11.	Přílohy:.....	100
11.1.	Příloha č.1 .....	100
11.2.	Příloha č.2 .....	102
11.3.	Příloha č.3 .....	104
11.4.	Příloha č.4 .....	106
11.5.	Příloha č.5 .....	107
11.6.	Příloha č.6 .....	109
11.7.	Příloha č.7 .....	111
11.8.	Příloha č.8 .....	113
11.9.	Příloha č.9 .....	116
11.10.	Příloha č.10 .....	119

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$A$	plocha	$[\text{m}^2]$
$A_e$	efektivní průtoková plocha	$[\text{m}^2]$
$A_V$	plocha otvoru ventilu	$[\text{m}^2]$
$D$	průměr pístu, pístnice	$[\text{m}]$
$D_V$	vnitřní průměr rozváděče	$[\text{m}]$
$F_c$	Coloumbovo tření	$[\text{N}]$
$F_T$	třecí síla	$[\text{N}]$
$F_{Ts}$	statické tření	$[\text{N}]$
$G$	viskózní tření	$[\text{N.s.m}^{-1}]$
$F_z$	silové zatížení pístu	$[\text{N}]$
$K_{SV}$	konstanta servoventilu	$[\text{m.V}^{-1}]$
$K_1, K_2$	konstanta	$[-]$
$KRi$	konstanty regulátoru	$[-]$
$L$	zdvih jednotky	$[\text{m}]$
$S$	efektivní plocha čel pístu	$[\text{m}^2]$
$T$	termodynamická teplota	$[\text{K}]$
$T_{priv}$	teplota přiváděného vzduchu	$[\text{K}]$
$T_{SV}$	časová konstanta ventilu	$[\text{s}]$
$U$	celková vnitřní energie	$[\text{J}]$
$V$	celkový objem	$[\text{m}^3]$
$V_A, V_B$	objem vzduchu v příslušné komoře jednotky	$[\text{m}^3]$
$V_{0A}, V_{0B}$	mrtvý (škodlivý) objem vzduchu příslušné komorové jednotky	$[\text{m}^3]$
$W$	absolutní práce	$[\text{J}]$
$c_p$	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	$[\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
$c_v$	měrná tepelná kapacita při konstantním objemu	$[\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
$g$	tíhové zrychlení	$[\text{m.s}^{-2}]$
$h_s$	šířka nákrůžku šoupátka	$[\text{m}]$
$h_d$	šířka drážky šoupátka	$[\text{m}]$
$m$	hmotnost	$[\text{kg}]$
$m_s$	hmotnost pístu	$[\text{kg}]$



$m_z$	hmotnost zatížení pístu	[kg]
$p$	tlak	[Pa]
$p_A, p_B$	tlak vzduchu v příslušné komoře jednotky	[Pa]
$p_d$	nízký tlak vzduchu (za průtokovým otvorem ventilu)	[Pa]
$p_h$	vysoký tlak vzduchu (před průtokovým otvorem ventilu)	[Pa]
$q_{priv}$	přivedené teplo do pracovního prostoru válce	[J]
$q_{odv}$	odvedené teplo z prac. prostoru válce	[J]
$r$	měrná plynová konstanta	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$v$	měrný objem	[m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> ]
$v$	rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$x$	poloha pístu	[m]
$x_0$	počáteční poloha pístu	[m]
$x_e$	efektivní výchylka šoupátka	[m]
$x_s$	výchylka šoupátka z rovnovážné polohy	[m]
$y$	dráha, výška	[m]
$z$	kompresibilní součinitel	[-]
$\alpha$	obecný termodynamický součinitel	[-]
$\alpha_{priv}$	obecný termodynamický součinitel pro přiváděný vzduch	[-]
$\alpha_{odv}$	obecný termodynamický součinitel pro odváděný vzduch	[-]
$\beta$	poměr tlaků	[-]
$\beta_{krit}$	kritický poměr tlaků	[-]
$\rho$	hustota	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\xi_{sv}$	poměrné tlumení ventilu	[-]

## 1. Úvod

Ve strojírenské výrobě, ale i v ostatních odvětvích, existuje mnoho důležitých faktorů, které ovlivňují úspěšnost vyráběného produktu na trhu. Konkurenční prostředí způsobuje, že cena není vždy nejdůležitějším faktorem. Trh je ve své podstatě přesycen zbožím kolísavé kvality, zejména pak zbožím asijských výrobců. Tyto výrobky jsou nabízeny často za nízké ceny. Přesto mnoho firem dává při nákupu zařízeních přednost dražším, ale spolehlivějším a kvalitnějším zařízením od renomovaných firem. Velký důraz je totiž kladen na kvalitu a spolehlivost. Z důvodu uplatnění v konkurenčním prostředí musí proto mnoho firem zvyšovat kvalitu výrobků. Firmy musí také investovat do automatizace výroby. A právě automatizace výroby není myslitelná bez využití elektrických, hydraulických a také pneumatických mechanismů.

Pneumatické mechanismy mohou být díky své adaptibilitě použity v mnoha různých průmyslových odvětvích. Každý typ mechanismů má určité výhody a nevýhody. Mezi výhody pneumatických mechanismů patří jejich jednoduchost, vysoká spolehlivost, nízká hmotnost a také příznivá cena. Další výhodou je jejich pružnost, spočívající v možnosti využití centrálního rozvodu stlačeného vzduchu, nacházejícího se v takřka každé výrobní hale. Dále také bezpečnost a čistota provozu, což umožňuje jejich nasazení v potravinářském, farmaceutickém, textilním, chemickém či těžebním průmyslu. Pneumatické mechanismy však mají v praxi mnohem menší uplatnění než mechanismy ostatní. Je to dáno zejména obtížností jejich řízení. Nositelem energie je zde totiž stlačitelný vzduch. To má za následek změnu vlastností systému při proměnlivém zatížení a dále pak vznikající problémy při rozbíhání, zastavování a reverzací pohybu.

Z důvodů nutnosti snižování nákladů na vývoj nových produktů se vytvářejí matematické modely, které popisují chování jednotlivých pneumatických konstrukčních prvků mechanismů, např. pneumatických motorů či proporcionálních ventilů. Modely pak lze využít k simulaci vlastností mechanismů v interakci s navrhovaným řídicím systémem bez nutnosti fyzické realizace. Tím dochází ke snížení finančních nákladů a také ke zkrácení času potřebného k vývoji nových produktů.

Neméně důležité je také sdílení výsledků. V současnosti neexistují funkční databáze matematických modelů. Informace sdílené v tištěné podobě i na internetu jsou

kusé a často neúplné. Pokud jsou nějaké matematické modely sestaveny, měly by být dány dispozici ostatním, aby nedocházelo k opětovnému řešení totožných problémů.

Předkládaná disertační práce se zabývá problematikou matematického modelování a simulací chování pneumatických mechanismů. Část práce také ukazuje možnosti sdílení matematického modelu pro ostatní aplikace, bez omezení nainstalovaným softwarem, operačním systémem či programovacím jazykem.

## 2. Cíle práce

Matematické modelování a následné simulace v některém z moderních simulačních prostředků výrazně usnadňují a zefektivňují návrh řídicích systémů pneumatických mechanismů. Nelze sice říci, že současná technická literatura je na informace a poznatky z modelování a simulací těchto systémů skoupá, nicméně problematika je velmi rozsáhlá a ne všechno je v dostupné literatuře obsaženo. To vedlo k volbě zaměření práce na tuto problematiku.

Hlavní cíle práce:

- odvození matematického modelu pneumatického proporcionálního ventilu, pneumatické lineární jednotky a regulátoru koncových poloh;
- v laboratoři sestavit konkrétní pneumatickou soustavu;
- seznámit se s možnostmi simulačních programů a následné sestavení simulačních schémat v programu Matlab Simulink;
- dle technických možností provést porovnání matematického modelu soustavy s reálným systémem a to porovnáním naměřených hodnot ze skutečného systému s hodnotami získanými odpovídající simulací;
- simulační schéma zveřejnit na internetu, umožnit provádět simulace včetně získávání příslušných výsledků přes síť internet, za pomoci prohlížeče www stránek. Umožnit přístup k výsledkům získaných simulací přes univerzální rozhraní, tedy nezávisle na operačním systému klienta (počítače uživatele) a jeho hardwarových dispozicích.

### 3. Současný stav problematiky

Moderní automatizované technologické procesy využívající pneumatické prvky, jsou v současnosti běžnou výbavou výrobních firem. Například v letech 1993 – 2000 vzrostla výroba pneumatických prvků cca 2,2 krát [www 3]. Z toho vyplývá nutnost zdokonalování stávajících produktů. Tato práce pojednává o několika produktech (pneumatických prvcích), převážně vyráběných společnostmi Festo. Je samozřejmostí, že pneumatických prvků je celá řada. V této kapitole je část nabídky jednotlivých prvků s přihlédnutím na možnosti použití a parametry. Výrobou a distribucí pneumatických prvků se zabývá kromě společností Festo či SMC mnoho dalších, větších či menších firem. Tyto dvě jmenované společnosti jsou jistě významnými výrobci těchto zařízení, nejedná se však o výrobce jedině.

Samozřejmostí v dnešních časech je používání výpočetní techniky a simulačního software. Pro vytvoření matematického modelu, který je součástí této práce, byl právě Matlab (konkrétně jeho toolbox Simulink) použit. Je však nutno zdůraznit, že se nejedná o jediný software, který je pro tento účel určen. V této kapitole bude proto představen i určitý souhrn programů, které jsou pro simulace pneumatických soustav určeny primárně i které se simulací těchto soustav zabývají pouze okrajově.

Poslední část této kapitoly hovoří o problematice proprietárních (specifických) formátů vstupů a výstupů a s tím souvisejících nevýhod dnešních aplikací, zejména aplikací zabývajících se simulacemi pneumatických soustav.

#### 3.1. *Pneumatická zařízení*

Největšími a nejvýznamnějšími výrobci pneumatických zařízení jsou firmy Festo a SMC. Obě společnosti mají zastoupení mimo jiné i v České republice.

Firma Festo AG & CO<sup>1</sup> byla založena v roce 1925 [www 1]. Roční obrát této společnosti je 1.400 milionů Euro a pracuje pro ní po celém světě 11.500 zaměstnanců. Autorizované zastoupení společnosti je v 39 zemích a servis společnost poskytuje dokonce v 176 zemích světa.

---

<sup>1</sup> V průběhu sestavování této práce byli několikrát kontaktováni pracovníci společnosti Festo a to jak v České republice, tak v Německu. Komunikace probíhala výhradně pomocí elektronické pošty. Některé otázky byly pracovníky zodpovězeny, někdy se ovšem pracovníci odvolávali na patenty atd. a požadované údaje nesdělili.

Korporace SMC byla založena v roce 1959 [www 2], její roční obrat se pohybuje ve výši 308.000 milionů Jenů (přibližně 2.073 milionů Euro) a zaměstnává 13.000 zaměstnanců. Společnost má autorizované zastoupení ve 32 zemích světa.

Dále existuje velké množství dalších malých či větších výrobců. Ze zahraničních společností je to kupříkladu společnost Hoeriger-Origa se 70 pobočkami po celém světě. Z tuzemských výrobců je to například společnost Stránský a Petržík s.r.o., působící na českém trhu již od roku 1991. Celkový souhrn společností, zabývajících se výrobou pneumatických prvků, by byl značně obsáhlý. Namátkou tedy ještě uvedme například firmy Bosch Rexroth, Seall, Poličské strojírny či Fluidtechnik Bohemia.

Sortiment, který výše uvedené firmy nabízejí, je značně rozsáhlý. V nabídce jsou pneumatické pohony a příslušenství k nim, výrobky pro manipulaci, polohovací systémy, ventily, různá čidla a mnoho dalších výrobků.

Pneumatický pohon lze definovat jako zařízení pro přenos energie a transformaci vstupních funkcí na výstupní, kde nositelem energie je vzdušina, zpravidla stlačený atmosférický vzduch. Pneumatické pohony lze dále rozdělit do několika podskupin a to:

- válce dle norem;
- kompaktní válce;
- přímočaré pohony;
- pohony se speciální funkcí;
- pohony armatur.

### **3.2. Simulační software a animační – kontrolní software**

V současné době je k dispozici několik softwarových nástrojů, umožňujících simulaci a animaci pneumatických obvodů. Kromě celkem známých softwarových nástrojů, jako je například Matlab a LabView, existuje spousta méně známých programů.

Institut pro hydraulické a pneumatické pohony a řízení RWTH Aachen vyvinul simulační program pro pneumatiku nazvaný SSP. Umožňuje uživateli simulovat chování sestaveného souboru pneumatických prvků.

Firmou Norgren-Martonair byl vytvořen program PNEUSIM. Je určen pro tvorbu schémat pneumatických obvodů s pneumatickým nebo elektropneumatickým řízením [14]. Umožňuje pohybovou animaci navržených obvodů, včetně animace spínání pneumatické, případně elektrické řídicí části, a tedy ověření správnosti zapojení navržených obvodů. Je vhodný jak pro profesionální použití v projekci zařízení, tak pro výukové účely na školách, kde ho lze využívat k ověření znalosti stavby pneumatických obvodů i řídicích logických sítí buď čistě pneumatických, nebo elektrických.

Firma Festo vyvinula program FluidSIM-P, který umožňuje:

- vytvořit schéma pneumatického nebo elektrického obvodu, včetně kombinace těchto obvodů;
- provádět zpětnou kontrolu navrženého obvodu;
- zadat rozměry a vlastnosti prvků;
- přecházet popis u každého prvku, přičemž u některých prvků je možné si prohlédnout i jejich fotografii a popis funkce;
- uložit a vytisknout schéma navrženého obvodu.

Dále je nutno uvést programový produkt firmy BOSCH nazvaný Animation Studio. Ten umožňuje:

- vytvořit schéma pneumatického, hydraulického i elektrického obvodu i jejich kombinace;
- zpětnou kontrolu funkčnosti navrženého obvodu;
- zadat rozměry zvolených prvků a provést animaci pohybu;
- u rozdělovačů zvolit jejich ovládání;
- přecházet popis u každého prvku, přičemž u některých prvků je možné si prohlédnout i jejich fotografii a popis funkce.

Jako další samostatné kapitoly jsou zařazeny programy Matlab, Labview, Dynast.

### **3.2.1. Integrované prostředí Matlab**

Matlab je integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, měření a zpracování signálů,

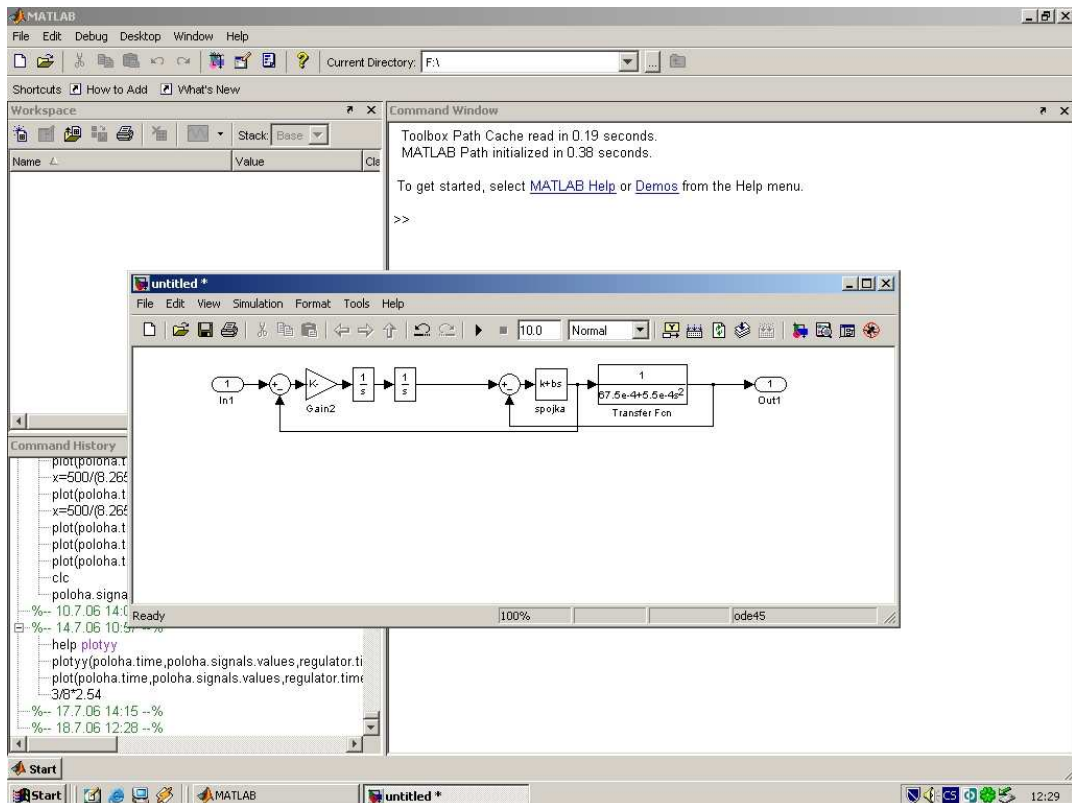
návrhy řídicích a komunikačních systémů [13]. Program existuje řadu let a prošel dlouhým vývojem. Vlastní Matlab není jen v jedné linii základního programu, ale používá se spousta rozšíření (toolbox). Nejznámější a asi nejpoužívanější je Simulink.

Simulink je program pro modelování a simulaci dynamických systémů, který využívá algoritmy Matlabu pro numerické řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Poskytuje uživateli možnost rychle a snadno vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat a rovnic.

Matlab je nástroj pro řešení a analýzu technické problematiky. Integruje výpočty, vizualizaci a programování do jednoduše ovladatelného prostředí, kde problémy a řešení jsou vyjádřeny pomocí matematických vztahů. Typické použití zahrnuje:

- matematiku a výpočty;
- tvorbu algoritmů;
- získávání dat;
- modelování a simulace;
- analýza dat, výzkum a vizualizace;
- vědecká a inženýrská grafika;
- tvorba aplikací včetně grafického zobrazení.





Obr. 3.1: Pracovní prostředí Matlabu

### 3.2.2. Programové prostředí LabVIEW

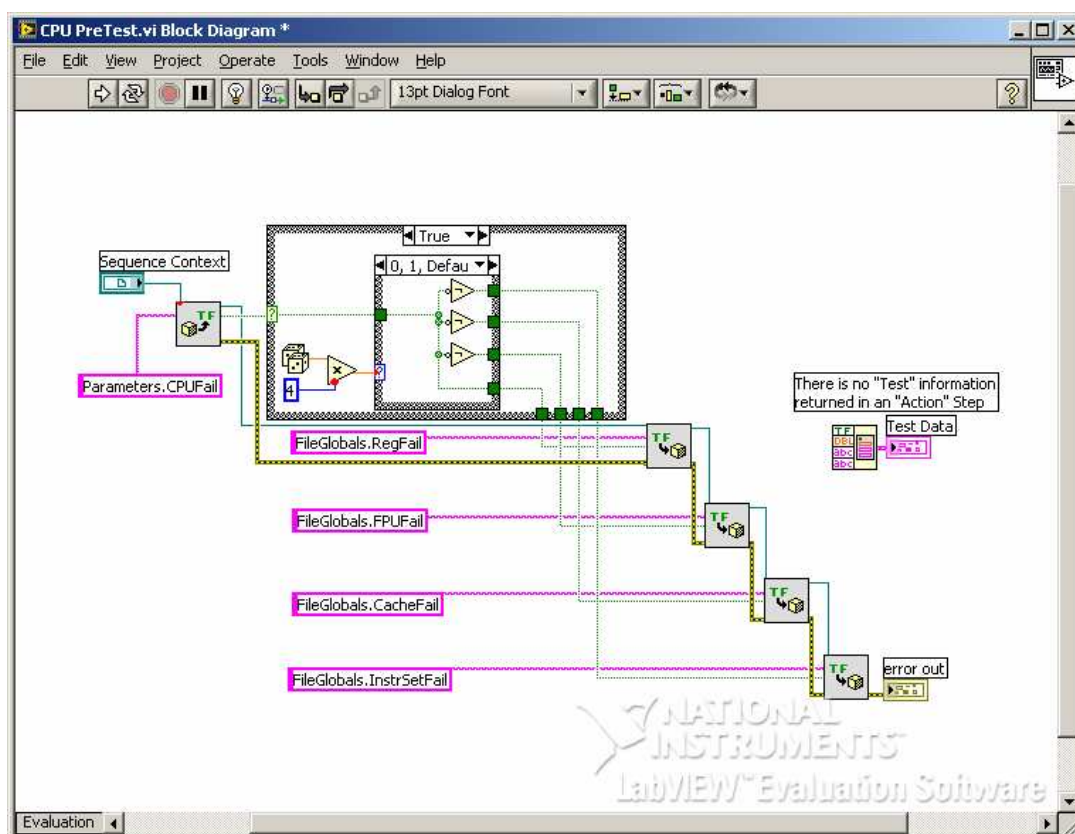
LabVIEW je vývojovým prostředím, postaveným na využití programovacího jazyka G [1]. Toto prostředí je zaměřeno na vývoj aplikací, zajišťujících řízení celého procesu sběru měřených dat, jejich analýzy a prezentace. Výrobce je firma National Instruments. Řada výrobců měřících a řídicích systémů vyvíjí a dodává ke svým výrobkům knihovny, které usnadňují použití jejich výrobků právě v tomto prostředí. LabVIEW je určeno zejména pro získávání dat a ovládání přístrojů, proto obsahuje knihovny funkcí a vývojové nástroje navržené speciálně k tomuto účelu. Lze ho však použít díky široké paletě dalších knihoven a funkcí i pro obecné programovací úlohy.

Výrobce National Instruments [2] tvrdí, že LabVIEW je jediným grafickým programovým prostředím, které obsahuje kompilátor generující optimalizovaný kód, jehož rychlost vykonání je srovnatelná s rychlostí kompilovaných programů v jazyce C. Aplikace vytvořené v LabVIEW jsou plně srovnatelné s aplikacemi vytvořenými i nízkoúrovňovými jazyky jako je C, avšak komfort jejich vytváření je podstatně vyšší.

Programátor se zbavuje starostí s řadou syntaktických detailů konvenčního programování a může se plně soustředit na řešení zadaného problému.

Při vytváření aplikace virtuálního přístroje se pracuje ve dvou základních oknech, označovaných jako „Front panel preview“ a „Block diagram preview“. V prvním zmiňovaném se vytváří vnější vzhled přístroje, tj. rozmístění prvků, jejich vzhled atd. Ve druhém okně modelujeme blokové schéma algoritmu aplikace. Schéma algoritmu aplikace se vytváří z několika entit:

- terminály – zajišťují komunikaci s předním panelem;
- funkce – výkonný aparát pro zpracování dat;
- interface – umožňuje přímý přístup k podporovanému hardware;
- ovladače – ovládání podporovaných periférií počítače;
- vodiče – zajišťují tok dat mezi ostatními entitami.



Obr. 3.2: Ukázka prostředí LabVIEW – block diagram preview

Prostředí LabVIEW obsahuje širokou škálu funkcí. Mezi matematické můžeme zařadit geometrické transformace, operace s maticemi, práce s polynomy, numerické řešení soustav algebraických i diferenciálních rovnic atd. Ve statistice je to porovnání signálů (korelace, konvariance), zpracování a roztřídění prvků jednoho či vícerozměrných polí podle stanovených kritérií. Ze zpracování signálu jsou to základní Fourierovy transformace, digitální filtry. Pokud uživatel nenajde žádnou vhodnou předdefinovanou funkci, může si napsáním skriptu vytvořit svoji vlastní. LabVIEW podporuje tzv. m-files, které využívá více specializovaných matematických softwarů.

### **3.2.3. Systém DYNAST**

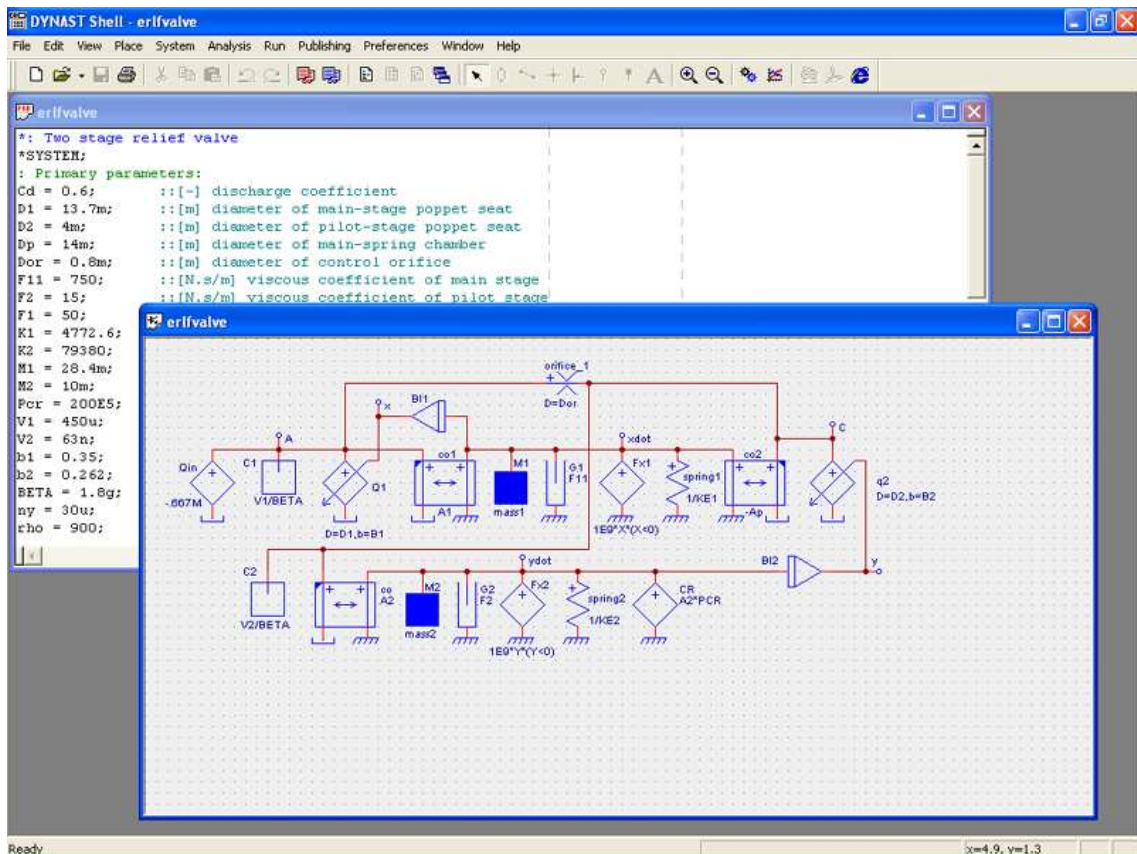
Systém DYNAST je sada nástrojů pro podporu modelování a simulace. Jeho jádro tvoří simulátor DYNAST a integrované uživatelské prostředí nazývané jako DYNASHELL.

Základní funkce integrovaného uživatelského prostředí jsou:

- příprava simulačních modelů;
- spouštění simulátoru;
- prezentace výsledků simulace;
- dokumentace;
- nápověda.

Uživatelské rozhraní je velmi podobné ostatním programům, uživatelé jsou v hlavním okně aplikace k dispozici:

- okna jednotlivých dokumentů;
- roletové menu;
- panel tlačítek;
- kontextové menu.



Obr. 3.3: Prostředí systému Dynast / Dynashell

Modely v tomto prostředí lze specifikovat graficky nebo pomocí rovnic. V případě grafické specifikace je k dispozici mnohopólový diagram nebo blokový diagram. Použít lze i editor diagramů. Ten umožňuje specifikovat simulační modely graficky a již obsahuje standardní knihovnu submodelů. Tu pak lze rozšiřovat o uživatelské submodely. Části modelů, které nelze graficky reprezentovat, lze zadávat pomocí formulářů jako rovnice, uživatelské funkce nebo parametry modelu.

Použít lze také několik typů analýz:

- numerická nelineární analýza (analýza nelineární soustavy v časové oblasti, statická analýza - výpočet pracovního bodu);
- numerická frekvenční analýza (analýza lineární soustavy ve frekvenční oblasti);
- semisymbolická frekvenční analýza (analýza lineární soustavy v časové nebo frekvenční oblasti, v symbolickém tvaru).

Zobrazování získaných dat je možné ve formě grafů. Jsou k dispozici různé režimy zobrazení, speciální pomůcky (odečítání souřadnic, sledování křivek, export do jiných programů, atd.). Data pro simulátor lze zadávat ručně v textové podobě, pomocí vstupního jazyka Dynastu. K tomu je určen specializovaný textový editor. Systém obsahuje integrovaný dokumentační systém, příkazy pro dokumentaci jsou součástí specifikace modelu. Výstup pak může být generován v různých formátech (HTML, PDF, PostScript). Dynast lze využít jako modelovací toolbox pro systém Matlab. Systém dále umožňuje simulaci ve 3D.

### ***3.3. Neuniverzálnost vstupů a výstupů současných aplikací***

Současné aplikace mají většinou proprietární vstupy a výstupy, zpravidla v binární podobě. To uživatelům neumožňuje používat projekty vytvořené v těchto aplikacích ve svých programech. V několika specifických případech je sice používání v jiných projektech (aplikacích) umožněno ale opět neuniverzálně. Univerzální používání by mělo fungovat tak, že uživatel vytvoří například aplikaci, která pracuje s modelem vytvořeným v LabView. Následně vytvoří obdobný model v prostředí Matlabu a bez zásahů do logiky aplikace může používat nově vytvořený model v Matlabu. Ideálním řešením by mohl být například vstup a výstup v jasně definovaném XML formátu. Jako jedna z možností, jak toto řešit, se nabízí používání web service, kde je jasně definován vstup a výstup pomocí souboru WSDL<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> V poslední části této práce (6.2) je navržena web service, umožňující použití modelu vytvořeného v Matlabu.

## 4. Teoretická část

### 4.1. Termomechanické jevy v pneumatických systémech

V pneumatických systémech dochází k jevům, které se popisují pomocí zákonů termodynamiky a mechaniky tekutin. Tyto zákony je nutno zohlednit při sestavování modelů jednotlivých částí polohového pneumatického systému.

Při práci systému je vzduch stlačován, mění svoji teplotu a hustotu. Proto je při odvozování matematického modelu brána v potaz interakce všech tří základních termodynamických (stavových) veličin – tlaku  $p$ , měrného objemu  $v$ , termodynamické teploty  $T$ , případně hustoty  $\rho$ .

Vzájemnou závislost těchto veličin popisují stavové rovnice [3],[4]. Nejznámější stavovou rovnicí je stavová rovnice ideálního plynu

$$pv = rT \quad (1)$$

- $r$  je měrná (individuální) plynová konstanta, která nabývá pro každý plyn jiné hodnoty. Pro vzduch je její hodnota rovna  $287 \text{ m}^2\text{s}^{-2}\text{K}^{-1}$ .

Pro odvození matematického modelu je výhodnější použít stavové rovnice ve tvaru

$$p = \frac{1}{V}mrT = r\rho T \quad (2)$$

- $V$  - objem plynu o celkové hmotnosti  $m$ ;
- $\rho$  - hustota plynu;
- $T$  - teplota plynu.

Vztah (2) je vhodný pro eliminaci hustoty  $\rho$ , teploty plynu  $T$  v odvozovaných vztazích.

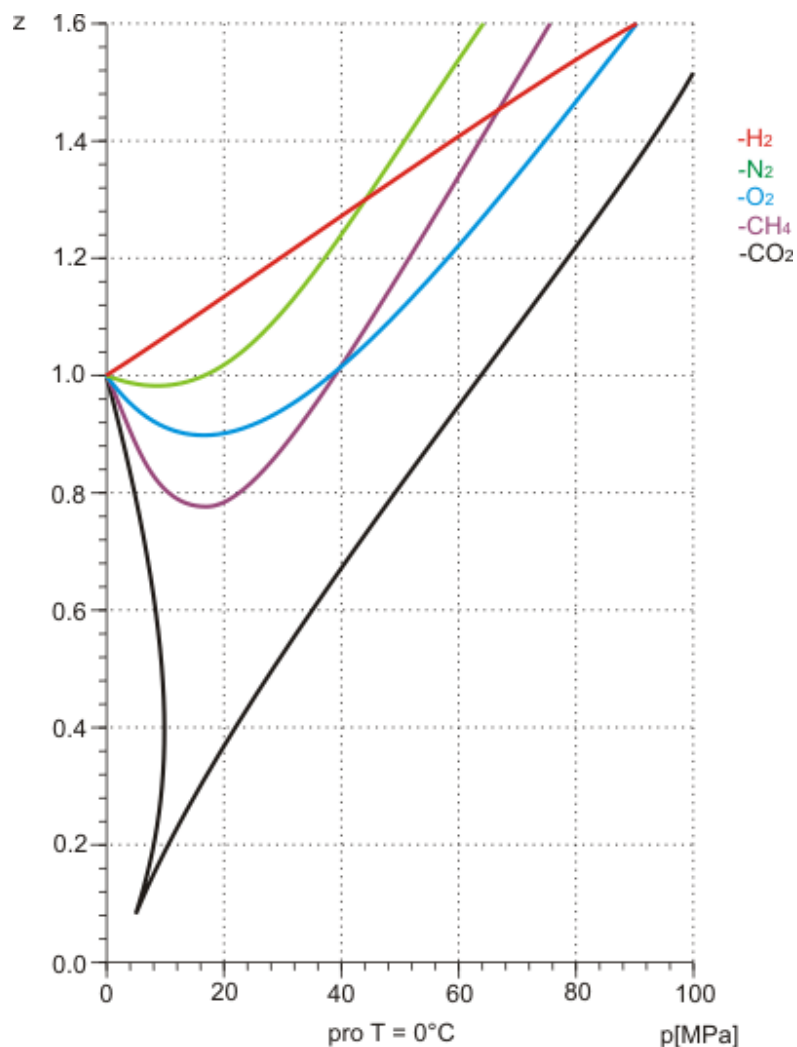
Jak již bylo řečeno, rovnice (1) je rovnicí ideálního plynu. Ideální plyn je takový plyn, kde na sebe vzájemně nepůsobí částice, a objem, který zaujímají, je nekonečně

malý. Takový plyn však v přírodě neexistuje. Chování reálného plynu vykazuje od rovnice (1) podle lit. [5] odchylku

$$z = \frac{pv}{rT} \neq 1 \quad (3)$$

➤  $z$  - kompresibilní součinitel.

V případě ideálního plynu je  $z$  roven jedné. Velikost součinitele závisí na chemickém složení plynu, tlaku  $p$  a teplotě  $T$ , viz Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Závislost kompresibilního součinitele na tlaku

Jednou z nejstarších a také nejjednodušších rovnic popisujících stavové chování reálných plynů je rovnice Van der Waalsova [3], pro kterou lze odvodit kompresibilní faktor ve tvaru

$$z = \frac{v}{v-b} - \frac{a}{rT^3(v+b)} \quad (4)$$

➤  $a$ ,  $b$  lze určit z podmínek v kritických bodech van der Waalsovy izotermy.

Odborná literatura [6] a [7] uvádí další stavové rovnice reálného plynu, například dvou konstantovou rovnici Redlichovu – Kwongovu, nebo viriální stavovou rovnici.

Stavové rovnice reálných plynů vystihují chování plynů lépe než stavové rovnice plynu ideálního. Na druhou stranu model vycházející ze stavové rovnice reálného plynu by byl v podstatě složitější na úkor stability a rychlosti simulačních výpočtů. Není také jisté, zda by bylo model efektivní. Vzhledem k výše uvedenému byl při odvozování modelu vzduch považován za ideální plyn.

Jak již bylo uvedeno, vzduch při práci pneumatického systému mění svoji teplotu a hustotu. Pro vyjádření změny hustoty  $\rho$  se využívá zákon zachování hmotnosti

$$m = \rho V = konst. \quad (5)$$

a zákon zachování mechanické energie [8]. Tento zákon, obvykle vyjádřený pomocí Bernoulliho rovnice, však nemůže být použit v klasickém tvaru, neboť předpokládá nestlačitelnost média. Proto se pro modelování pneumatického systému používá analogický vztah v diferenciálním tvaru

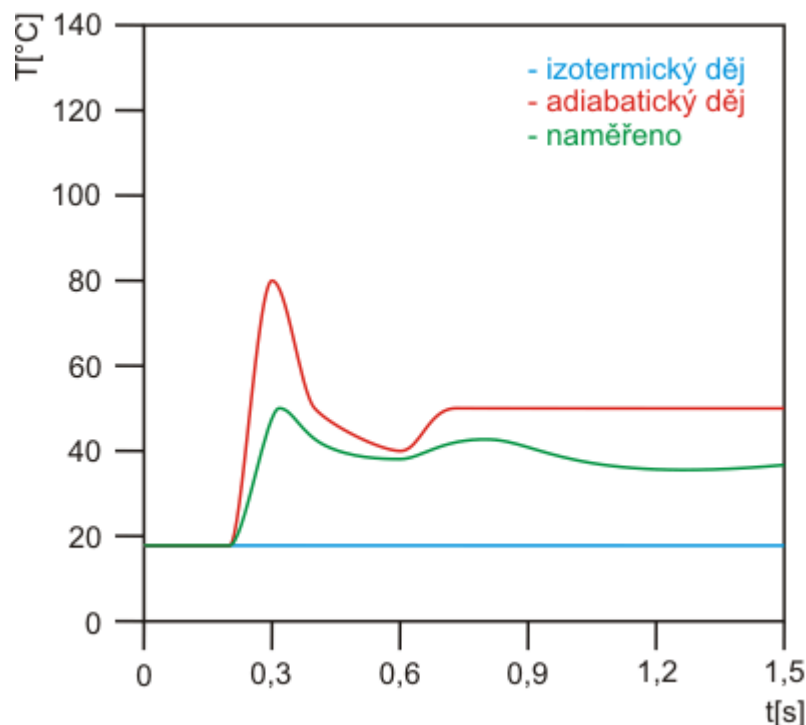


$$v \cdot dv + \frac{dp}{\rho} + g \cdot dy = 0 \quad (6)$$

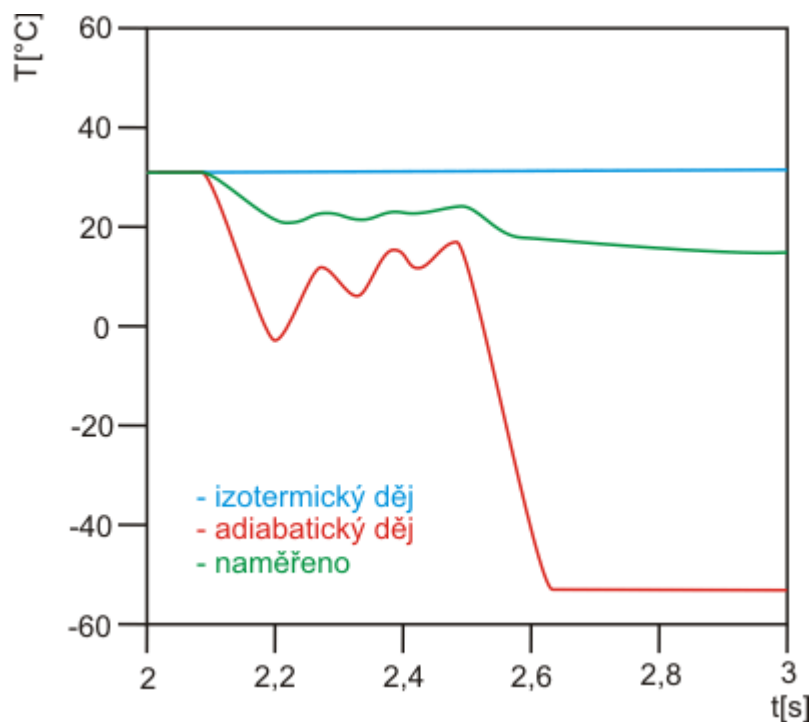
- $dv$ ,  $dp$ ,  $dy$  jsou přírůstky proměnných  $v$ ,  $p$  a  $y$ , které vzniknou podél dráhy sledované malým objemem tekutiny v ustáleném proudu, kdy rychlost proudění je tečna k proudnici.

Po dosazení uvažovaných změn hustoty  $\rho$ , do vztahu (6) a následné integraci tohoto vztahu získáme klasickou Bernoulliho rovnice.

V průběhu činnosti pneumatického systému je plyn stlačován, ohříván, dostává se z jednoho stavu do druhého. Dochází tedy k takzvaným termodynamickým dějům (procesům). Při modelování pneumatického systému se většinou předpokládá, že tyto děje jsou adiabatické [9]. Podle lit. [10] není tento předpoklad zcela přesný. Při sledování časové závislosti teploty vzduchu při jeho kompresi a expanzi v pracovních prostorech pneumatického válce se ukazuje, že při kompresi vzduchu se děj blíží ději adiabatickému a při expanzi ději izotermickému. Viz Obr. 4.2, Obr. 4.3.



Obr. 4.2: Porovnání měřené teploty při kompresi vzduchu s konvenčními termodynamickými ději



Obr. 4.3: Porovnání měřené teploty při expanzi vzduchu s konvenčními termodynamickými ději  
Pro hodnoty stavových veličin při ději izotermickém platí

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad (7)$$

při ději adiabatickém

$$p_1 v_1^K = p_2 v_2^K, \text{ resp. } p_1 \rho_1^K = p_2 \rho_2^K \quad (8)$$

- $p_1, v_1, \rho_1$  - tlak, objem a hustota vzduchu na počátku termodynamického děje,
- $p_2, v_2, \rho_2$  - tlak, objem a hustota po jeho ukončení,
- $\kappa$  - izoentropický součinitel (Poissonova konstanta) je definován poměrem měrných tepelných kapacit.

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (9)$$

jeho hodnota je pro vzduch 1,4 [3], [4], [11]. Mezi výše uvedenými měrnými tepelnými kapacitami platí též Mayerova rovnice

$$c_p - c_v = r \quad (10)$$

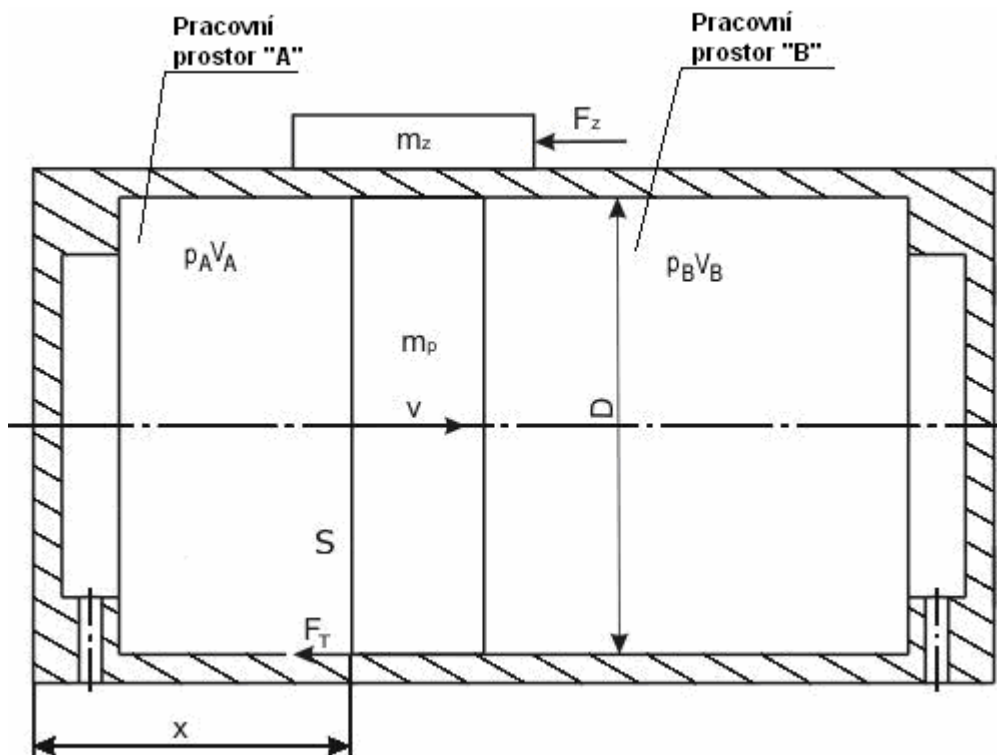
která je také využita při odvozování modelu.

Závěrem tedy shrňme předpoklady pro odvození matematického modelu pneumatického systému:

- vzduch má v tomto případě vlastnosti velmi blízké ideálnímu plynu, tzn. je stlačitelný, neviskózní, odpovídá svými vlastnostmi Boyle-Moriotteovu a Gay-Lussacovu zákonu. Z toho vyplývá, že zcela vyhovuje stavové rovnici (1), tepelné kapacity při konstantním objemu a tlaku jsou konstantní a platí mezi nimi vztahy (9) a (10), vnitřní energie jsou závislé pouze na teplotě;
- proudění je jednorozměrné;
- setrvačné účinky vzduchu jsou zanedbatelné;
- teplota a tlak jsou ve sledovaných kontrolních objemech homogenní (jsou v každém místě prostoru v daný časový okamžik stejné).

## 4.2. Matematické modely

### 4.2.1. Pneumatická lineární jednotka



Obr. 4.4: Pneumatická lineární jednotka

Pohybovou rovnici zatíženého pístu lineární pneumatické jednotky lze podle Obr. 4.4 vyjádřit vztahem

$$(m_z + m_p)\ddot{x} + F_T + F_z = p_A S - p_B S \quad (11)$$

- $m_z$  - hmotnostní zatížení pístu;
- $m_p$  - hmotnost pístu;
- $S$  - efektivní plochy čel pístu, na které působí absolutní tlaky  $p_A$  a  $p_B$  v pracovních prostorech pneumatického válce.

Velikost plochy  $S$  čela pístu je dána vztahem

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \quad (12)$$

- „A“, „B“ - indexy příslušného pracovního prostoru válce;
- $D$  - průměr pístu.

Na základě prvního zákona termodynamiky pro vzduch vstupující a vystupující z pracovního prostoru lineární pneumatické jednotky, podle lit. [12] platí energetická rovnice

$$q_{pri} - q_{odv} + \kappa c_v (\dot{m}_{pri} T_{pri} - \dot{m}_{odv} T) - \dot{W} = \dot{U} \quad (13)$$

- $q_{pri}$  je přivedené teplo do pracovního prostoru válce;
- $q_{odv}$  odvedené teplo z pracovního prostoru válce;
- $T_{pri}$  je teplota přiváděného vzduchu;
- $T$  je teplota vzduchu v pracovního prostoru válce;
- $\dot{W}$  je derivace vykonané absolutní práce;
- $\dot{U}$  změna vnitřní energie.

Sloučením poměru tepelných kapacit (9) s Mayerovou rovnicí (10) získáme pro měrnou tepelnou kapacitu  $c_v$  vztah

$$c_v = \frac{r}{\kappa - 1} \quad (14)$$

V energetické rovnici (13) nahradíme derivaci absolutní práce  $\dot{W}$  vztahem

$$dW = p.dV \quad (15)$$

měrnou tepelnou kapacitu  $c_v$  vztahem (14) a po jednoduché úpravě dostaneme

$$q_{pri} - q_{odv} + \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p}{pT} (\dot{m}_{pri} T_{pri} - \dot{m}_{odv} T) \frac{\kappa}{\kappa - 1} p \dot{V} = \dot{U} \quad (16)$$

Celková změna vnitřní energie je rovna

$$\dot{U} = \frac{d}{dt}(c_v m T) = \frac{1}{\kappa - 1} \frac{d}{dt}(pV) = \frac{1}{\kappa - 1} (V\dot{p} + p\dot{V}) \quad (17)$$

provedeme náhradu v rovnici (15)

$$q_{pri} - q_{odv} + \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p}{T} (\dot{m}_{pri} T_{pri} - \dot{m}_{odv} T) - \frac{\kappa}{\kappa - 1} p\dot{V} = \frac{1}{\kappa - 1} V\dot{p} \quad (18)$$

V případě adiabatického děje je přenos tepla nulový ( $q_{pri} - q_{odv} = 0$ ). Dále lze předpokládat přibližnou rovnost teploty  $T_{pri}$  přiváděného tlakového vzduchu do pracovního prostoru válce s teplotou  $T$  vzduchu v pracovním prostoru válce. Po této úvaze je možné z rovnice (18) vyjádřit derivaci tlaku

$$\dot{p} = \kappa \frac{p}{V} (\dot{m}_{pri} - \dot{m}_{odv}) - \kappa \frac{p}{V} \dot{V} \quad (19)$$

Nebo po dosazení ze stavové rovnice (2) za hustotu  $\rho$  ve formě

$$\dot{p} = \kappa \frac{rT}{V} (\dot{m}_{pri} - \dot{m}_{odv}) - \kappa \frac{p}{V} \dot{V} \quad (20)$$

Obdobným způsobem lze analogicky odvodit pro izotermický děj rovnici derivace tlaku

$$p' = \frac{rT}{V} (\dot{m}_{pri} - \dot{m}_{odv}) - \frac{p}{V} \dot{V} \quad (21)$$

Na základě experimentů [10] bylo uvedeno, že při termodynamických dějích, probíhajících v pracovním prostoru válce, leží teplota tlakového vzduchu mezi adiabatickou a izotermickou teplotní křivkou. Při proudění vzduchu z pracovního

prostoru válce se blíží více křivce izotermické, při proudění do pracovního prostoru válce křivce adiabatické. Z porovnání rovnic (20) a (21) je zřejmá odlišnost v absenci izotropického součinitele  $\kappa$ , v rovnici (21). Záměnou součinitele  $\kappa$  za obecné součinitele  $\alpha$ ,  $\alpha_{pri}$ ,  $\alpha_{odv}$  v (20) dostaneme rovnici tlaků

$$\dot{p} = \frac{rT}{V} (\alpha_{pri} \dot{m}_{pri} - \alpha_{odv} \dot{m}_{odv}) - \alpha \frac{p}{V} \dot{V} \quad (22)$$

Nastavováním hodnot zavedených součinitelů v rozmezí 1 až  $\kappa$  lze libovolně měnit průběh termodynamického děje, pro hodnotu 1 je izotermický, pro hodnotu  $\kappa$  je adiabatický.

Pro závislost objemu pracovního prostoru válce na poloze pístu platí vztahy

$$V_A = V_{0A} + S(x_0 + x) \quad (23)$$

$$V_B = V_{0B} + S(x_0 - x) \quad (24)$$

- $x_0$  - počáteční poloha pístu;
- $V_{0A}$ ,  $V_{0B}$  - mrtvý (škodlivý) objem vzduchu v pracovních prostorech válce „A“, „B“.

Dosazením do (22) za objem  $V$  z (23), (24) obdržíme pro derivaci tlaku výsledné rovnice

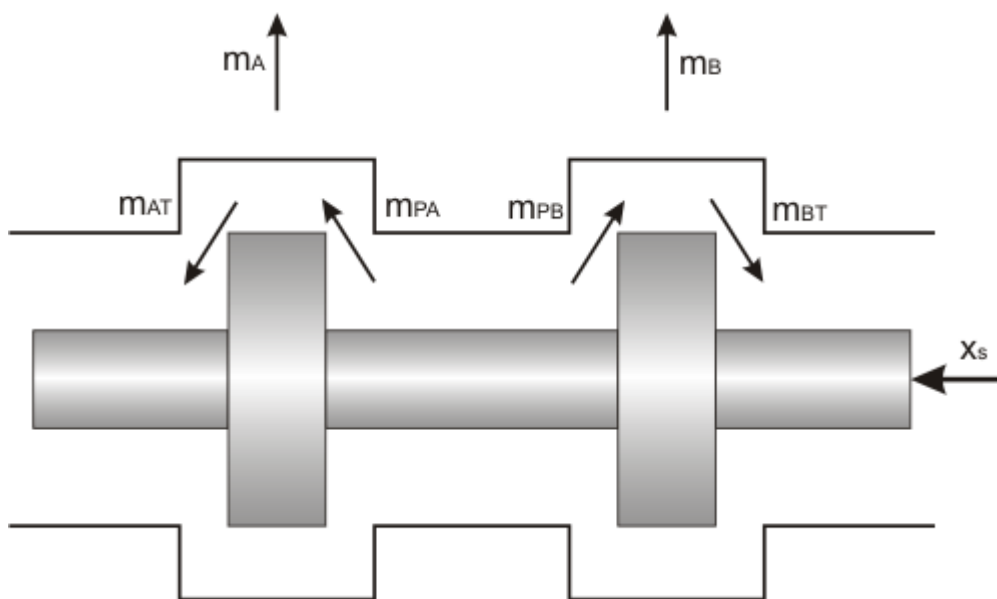
$$\dot{p}_A = \frac{r \cdot T}{V_{0A} + S \cdot (x_0 + x)} (\alpha_{pri} \cdot \dot{m}_{A_{pri}} - \alpha_{odv} \cdot \dot{m}_{A_{odv}}) - \alpha \cdot \frac{p_A \cdot S}{V_{0A} + S \cdot (x_0 + x)} \cdot \dot{x} \quad (25)$$

$$\dot{p}_B = \frac{r \cdot T}{V_{0B} + S \cdot (x_0 - x)} (\alpha_{pri} \cdot \dot{m}_{B_{pri}} - \alpha_{odv} \cdot \dot{m}_{B_{odv}}) + \alpha \cdot \frac{p_B \cdot S}{V_{0B} + S \cdot (x_0 - x)} \cdot \dot{x} \quad (26)$$

#### 4.2.2. Pneumatický servoventil

Hlavním elementem ovlivňujícím dynamiku servoventilu je šoupátko. Jeho poloha je řízena pomocí elektromechanického převodníku a výslednou dynamiku otevření ventilu lze přesně popsat pomocí proporcionálního členu se setrvačností druhého řádu, jehož charakteristické hodnoty je možno určit z katalogových údajů. Vlastní frekvence  $T_{sv}$  se odečte z frekvenční charakteristiky, obdobně se stanoví i hodnota součinitele poměrného tlumení  $\xi$ , jelikož ventily jsou zpravidla dobře tlumené systémy s aperiodickým průběhem odezvy. Poloha šoupátka je modelována v závislosti na řídicím napětí  $u$  pomocí diferenciální rovnice 2. řádu

$$T_{sv}^2 \cdot \ddot{x}_s + 2 \cdot \xi_{sv} \cdot T_{sv} \cdot \dot{x}_s + x_s = K_{sv} \cdot u \quad (27)$$



Obr. 4.5: Šoupátko pneumatického servoventilu a hmotnostní toky přes řídicí hrany



### 4.2.3. Odvození hmotnostního průtoku a průtokové plochy ventilu MPYE

Velikost hmotnostních toků přes řídicí hrany ventilu, ze kterých se určí výsledný tok do prostoru pneumatického válce a do okolí, se určí pomocí modelování toku plynu přes trysku.

Pomocí Bernoulliho rovnice vyjádřené v diferenciálním tvaru se určí výtoková rychlost stlačitelného vzduchu při uvažování adiabatické změny stavu. Hmotnostní toky přes řídicí hrany ventilu se určí obecně podle vztahu

$$\dot{m}_v = c_0 A_e(x_s) p_h \sqrt{\frac{2}{RT}} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[ \left( \frac{p_d}{p_h} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_d}{p_h} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (28)$$

- $h$  - prostor odkud proudí vzduch s vyšším tlakem;
- $d$  – prostor kam proudí vzduch s nižším tlakem),  $p_h \geq p_d$  .

Hmotnostní tok závisí na tlaku  $p_h$  a na poměru tlaků  $p_d/p_h$ . Čím větší je rozdíl tlaků před a za průtočným průřezem  $\Delta p_{hd} = p_h - p_d$ , tedy menší poměr  $p_d/p_h$ , tím vyšší je hmotnostní průtok. Zvyšování průtoku však není lineárně závislé, je určeno nelineární funkcí

$$\psi = \psi\left(\frac{p_d}{p_h}\right), \text{ jejíž hodnota je do kritického poměru tlaků}$$

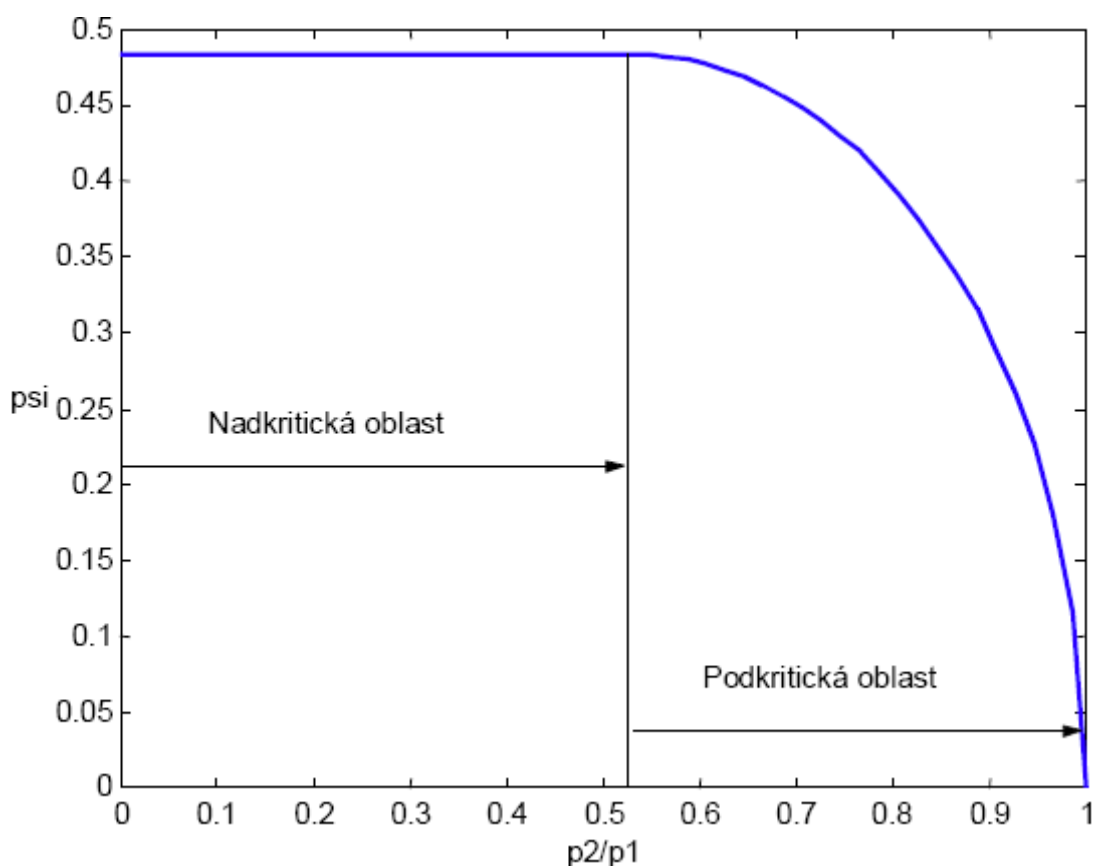
$$\beta_{krit} = \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (29)$$

určena vztahem

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[ \left( \frac{p_d}{p_h} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_d}{p_h} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (30)$$

a dále je rovna maximu dosaženému pro kritický poměr  $\beta$ . Pro vzduch platí, že kritický poměr tlaků  $\beta_{krit} = 0,528$ . To je však platné pouze pro ideální dýzu (nátrubek), kdy se shoduje výstupní průměr s místem zúžení.

$$\dot{m} = c_0 A_e(x_s) p_h \sqrt{\frac{2}{RT}} \psi\left(\frac{p_d}{p_h}\right) \quad (31)$$



Obr. 4.6: Průběh funkce  $\psi = \psi\left(\frac{p_d}{p_h}\right)$

Odvozené vztahy (28) a (31) je nutno před jejich aplikací v modelu pneumatického proporcionálního ventilu zjednodušit. Zavedením konstant  $K_1$ ,  $K_2$  se získá konečný tvar průtokové rovnice jedním otvorem ventilu

$$\dot{m}_v = \mu A_v K_1 \frac{p_h}{\sqrt{T}} \quad \text{pro } \frac{p_d}{p_h} \leq \beta_{krit} \quad (32)$$

$$\dot{m}_v = \mu A_v K_2 \frac{p_h}{\sqrt{T}} \left( \frac{p_d}{p_h} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{1 - \left( \frac{p_d}{p_h} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \quad \text{pro } \frac{p_d}{p_h} > \beta_{krit} \quad (33)$$

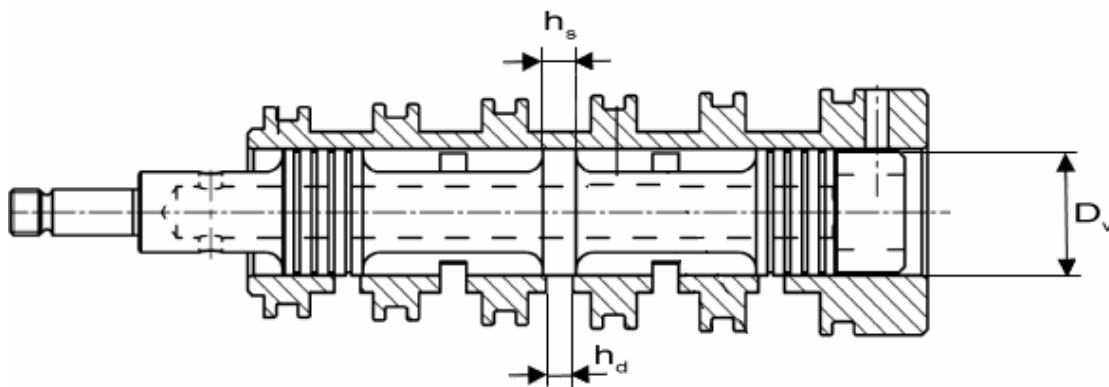
➤  $A_v$  - plocha otvoru ventilu.

Konstanty  $K_1$  a  $K_2$  pro vzduch nabývají hodnot:

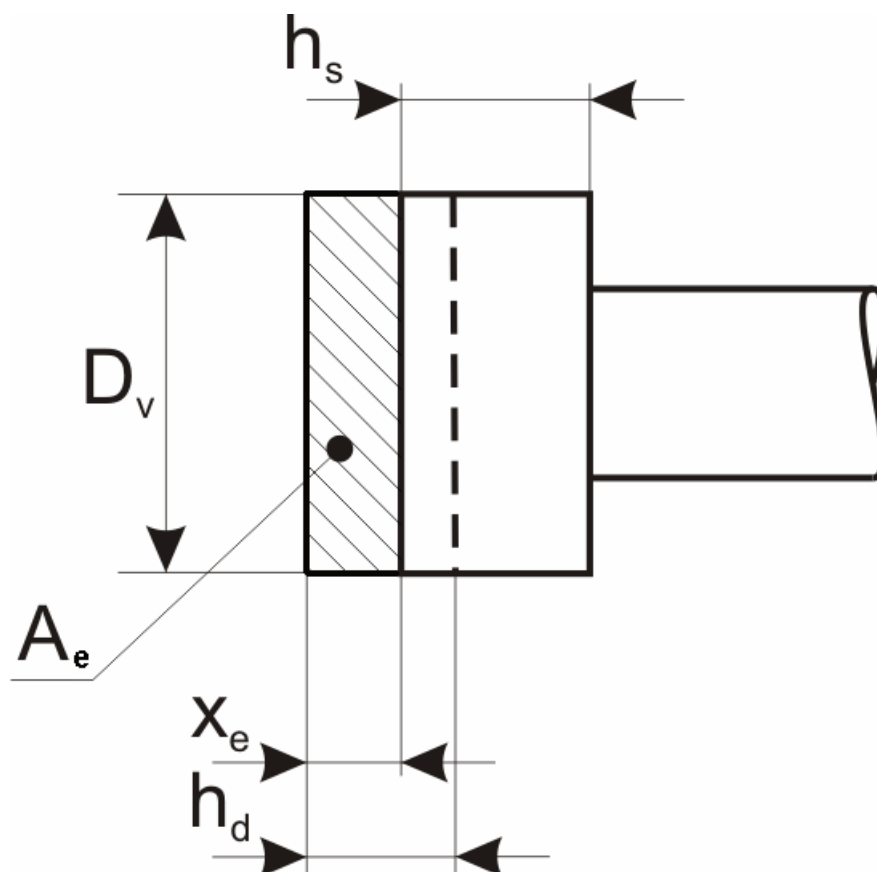
$$K_1 = \sqrt{\frac{\kappa}{r} \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} = 0,040418 \quad (34)$$

$$K_2 = \sqrt{\frac{2\kappa}{r(\kappa-1)}} = 0,156174 \quad (35)$$

Pro ucelenost kapitoly následuje výpočet průtočné plochy otvoru ventilu MPYE podle dostupné literatury a dotazů u fy. Festo. Vycházelo se z Obr. 4.7 a Obr. 4.8 . Z informativního řezu na Obr. 4.7 vyplývá, že pouzdro šoupátka je opatřeno zářezy, přibližné rozměry jsou na Obr. 4.8.



Obr. 4.7: Informativní řez ventilem MPYE



Obr. 4.8: Průtokový otvor

Pro efektivní průtokovou plochu  $A_e$  tvaru obdélníku podle Obr. 4.8 platí rovnice:

$$A_e = x_e \cdot \pi \cdot D_v \left[ m^2 \right] \quad (36)$$

➤  $D_v$  je vnitřní průměr rozváděče (Obr. 4.7)

Závislost efektivní výchylky  $x_e$  na výchylce  $x_s$  šoupátka je vyjádřena vztahem

$$x_e = x_s - \frac{1}{2} \cdot (h_s - h_d) \quad (37)$$

➤  $h_s$  - šířka šoupátka podle Obr. 4.8

➤  $h_d$  - šířka drážky podle Obr. 4.8

Dosazením za  $x_e$  do rovnice (36) získáme matematická vyjádření průtokových ploch napájecího a levého a pravého výfukového otvoru

$$A_{v_{nap}} = 0 \quad \text{pro } |x_s| \leq \frac{1}{2}(h_s - h_d) \quad (38)$$

$$A_{v_{nap}} = \left[ |x_s| - \frac{1}{2} \cdot (h_s - h_d) \right] \cdot \pi \cdot D_v \quad \text{pro } \frac{1}{2}(h_s - h_d) < |x_s| < \frac{1}{2}(h_s + h_d) \quad (39)$$

$$A_{v_{nap}} = h_d \cdot \pi \cdot D_v \quad \text{pro } |x_s| \geq \frac{1}{2}(h_s + h_d) \quad (40)$$

$$A_{v_{vyf1}} = h_d \cdot \pi \cdot D_v \quad \text{pro } x_s \leq -\frac{1}{2}(h_s + h_d) \quad (41)$$

$$A_{v_{vyf1}} = \left[ |x_s| - \frac{1}{2} \cdot (h_s - h_d) \right] \cdot \pi \cdot D_v \quad \text{pro } -\frac{1}{2}(h_s + h_d) < x_s < -\frac{1}{2}(h_s - h_d) \quad (42)$$

$$A_{v_{vyf1}} = 0 \quad \text{pro } x_s \geq -\frac{1}{2}(h_s - h_d) \quad (43)$$

$$A_{v_{vyf2}} = 0 \quad \text{pro } x_s \leq \frac{1}{2}(h_s - h_d) \quad (44)$$

$$A_{v_{vyf1}} = \left[ |x_s| - \frac{1}{2} \cdot (h_s - h_d) \right] \cdot \pi \cdot D_v \quad \text{pro } \frac{1}{2}(h_s - h_d) < x_s < \frac{1}{2}(h_s + h_d) \quad (45)$$

$$A_{v_{vyf2}} = h_d \cdot \pi \cdot D_v \quad \text{pro } x_s \geq \frac{1}{2}(h_s + h_d) \quad (46)$$

Tyto rovnice byly použity pro sestavení matematického modelu v kapitole 5.3.2.

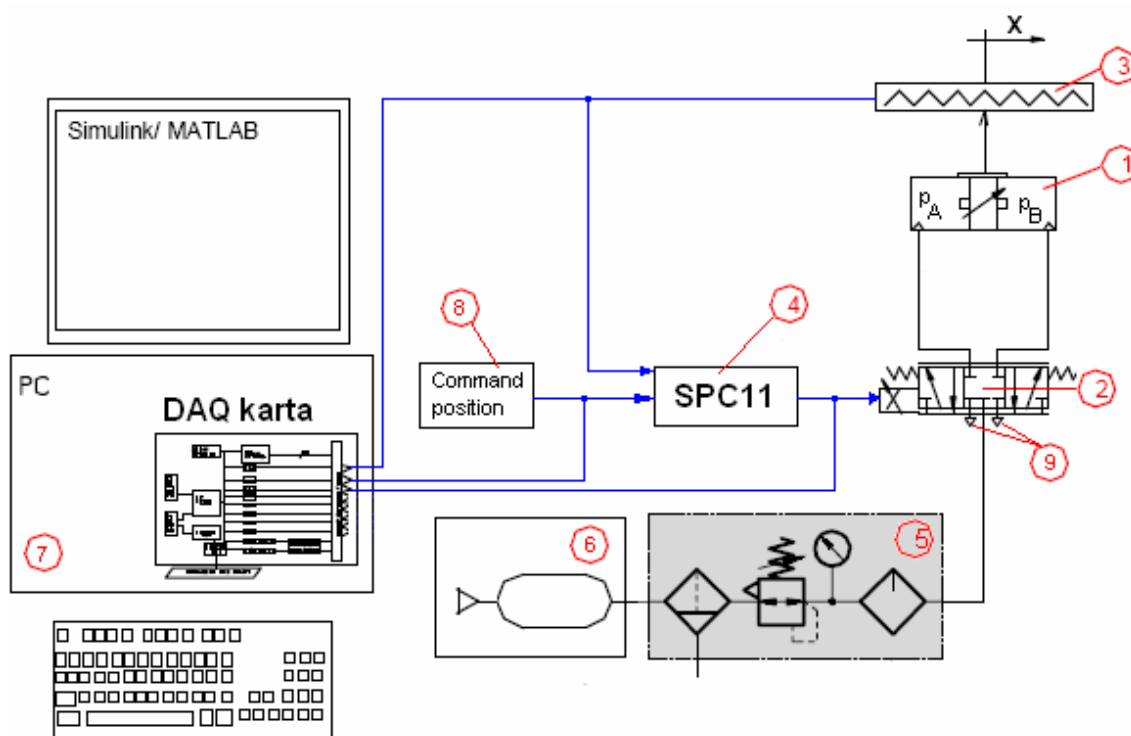
## 5. Experimentální část

### 5.1. *Pneumatický polohový servosystém*

V rámci doktorské práce byl sestaven reálný pneumatický servosystém, jehož blokové schéma je na Obr. 5.1. Základem systému je pneumatický obvod zkompletovaný převážně z dílu společnosti Festo.

Hlavní konstrukční prvky obvodu:

- lineární pneumatická bezpístnicová jednotka Festo (pos. 1);
- elektro-pneumatický proporcionální ventil Festo MPYE (pos. 2.);
- potenciometrický snímač polohy (pos. 3);
- regulátor koncových poloh SPC11 (pos. 4);
- tlumiče hluku Festo (pos. 9);
- zdroj tlakového vzduchu (pos. 6);
- redukční ventil s filtrem (pos. 5);
- zadávání žádané polohy (pos. 8);
- počítač (pos. 7).



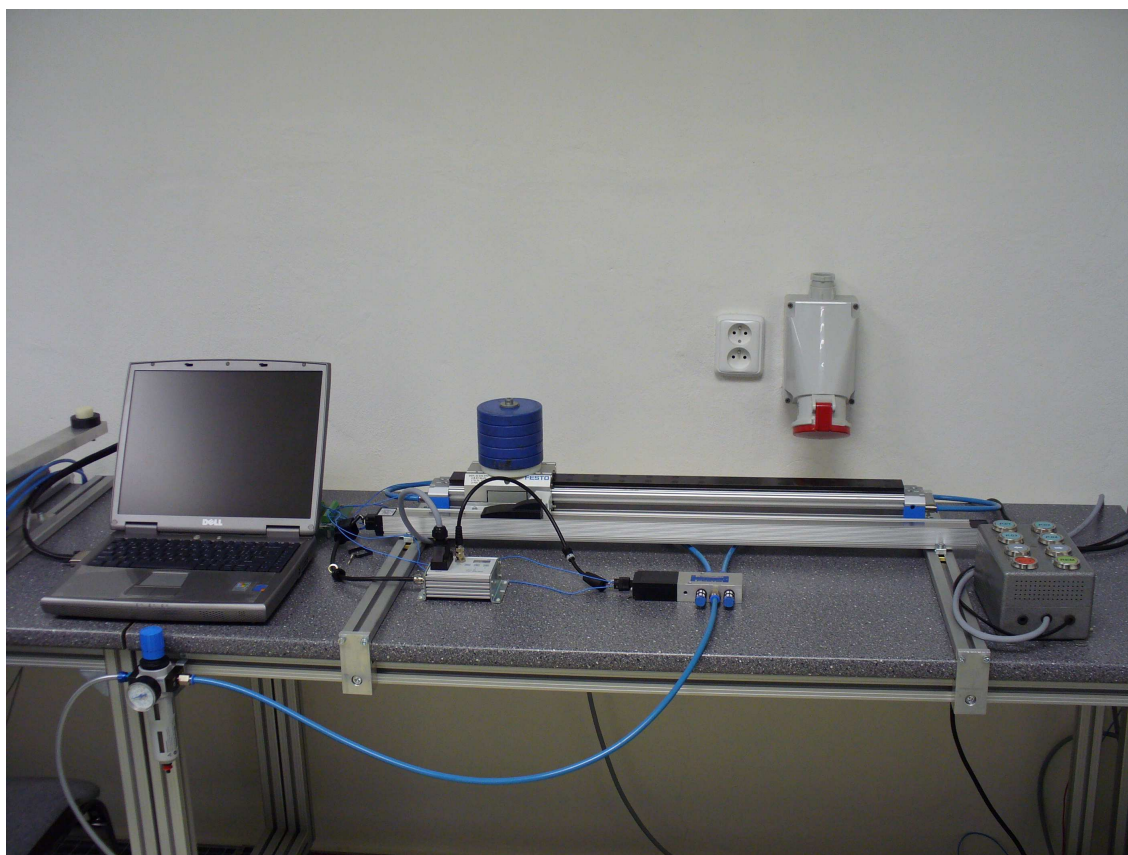
Obr. 5.1: Schéma pneumatického servosystému

Analogový výstup z lineárního potenciometru, odpovídající aktuální poloze pístu, je využit jako vstupní parametr do regulátoru koncových poloh SPC11, pro stanovení regulační odchylky, tj. rozdílu mezi skutečnou a žádanou polohou. Vypočítaná regulační odchylka je v regulátoru převedena na řídicí napěťový signál, který je přiveden na ventil MPYE. Dojde k jeho otevření a přivedení tlakového vzduchu do lineární pneumatické jednotky DPGL a změně polohy pístu.

Pro veškerá provedená měření byl využit software Matlab - Simulink s Real Time Toolboxy, konkrétně Real Time Windows Target. Jako interface byla použita multifunkční PCMCIA karta DAQ 6024E. Na kartě byly využívány analogové vstupy a výstupy s měřicími rozsahy  $\pm 10[V]$ .

Snímány byly veličiny:

- žádaná poloha pístu;
- skutečná poloha pístu;
- řídicí napěťový signál přivedený na ventil.



Obr. 5.2: Pracoviště s pneumatickým polohovacím systémem

## 5.2. Popis komponent pneumatického systému

### 5.2.1. Lineární pneumatická jednotka DPGL

Pneumatická lineární jednotka DPGL-32-500-PPV-A-B-KF-SH-D2 od fy. Festo je dvojčinným bezpístnicovým pohonem. Konstrukce jednotky je patrná z Obr. 5.3.

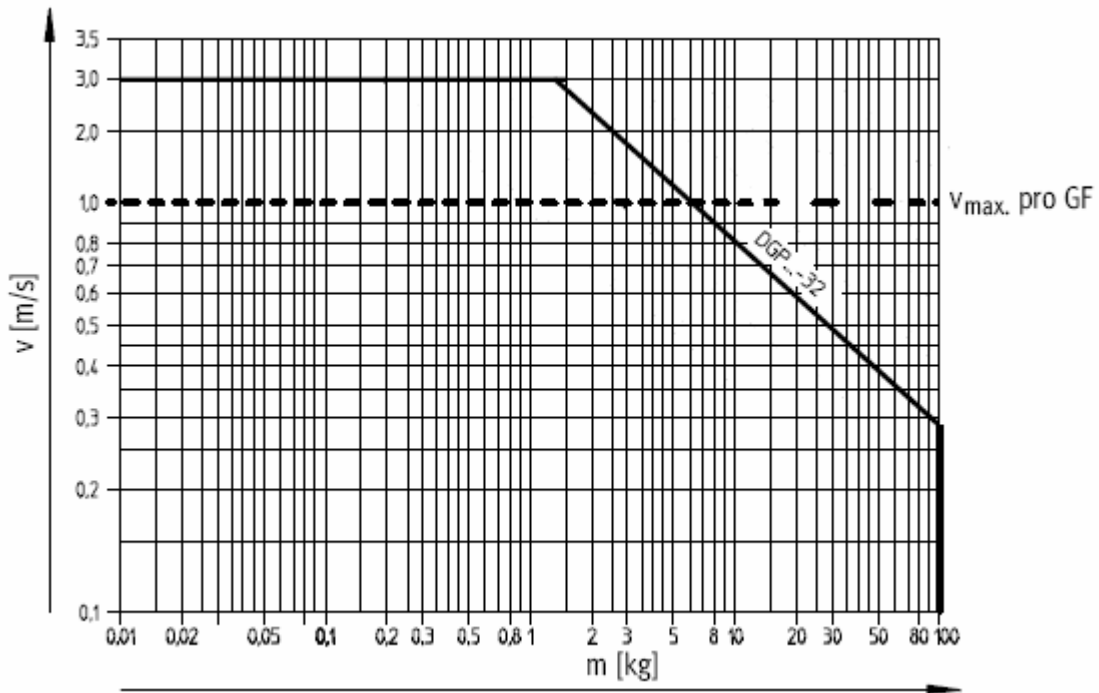


Obr. 5.3: Pneumatická jednotka DGPL

Na tělese 1 jednotky DGPL je umístěno vedení 2, po kterém se pohybuje jezdec 3. Vedení zamezuje pootočení při zatížení jezdce kroučícím momentem. Spojení mezi vedením a jezdcem je realizováno kuličkovým uložením. Z důvodu nižších pasivních odporů je výhodnější kuličkové uložení, oproti variantě s kluzným uložením. Průměr pístu je 32 mm a maximální zdvih 500 mm. Pro zaručení bezrázového pohybu v koncových polohách je jednotka DPGL vybavena nastavitelným tlumením koncových poloh. Délka tlumení je 20 mm.

Provozním médiem je filtrovaný stlačený vzduch o tlaku 2 až 8 bar, který je přiveden na do DGPL jednotky podle směru pohybu pístu. Maximální dovolená provozní rychlost (bez zatížení) je 3 m/s. Tuto hodnotu uvádí výrobce v katalogu, Obr. 5.4. Skutečná max. dovolená rychlost je nižší a závisí na pracovní poloze jednotky, na velikosti a způsobu zatížení. Využitelná teoretická síla jednotky je při tlaku 6 bar 483 N.





Obr. 5.4: Závislost max. rychlosti pístu na hmotnostním zatížení, lit. [16]

### 5.2.1.1. Identifikace parametrů lineární pneumatické jednotky DGPL

Pro výpočet polohy  $x$  pístu lineární pneumatické jednotky DPGL-32-500-PPV-A-B-KF-SH-D2 z pohybové rovnice (11) je nutné znát hmotnost pohybujících se částí, velikost třecích sil ve válci a velikost čelních plochy pístu.

Velikost čelní plochy  $S$  pístu vypočítáme ze vztahu (12). Průměr pístu je 32 mm. Výsledná velikost:  $S = 8,04 \cdot 10^{-4} [m^2]$ . Hmotnost pohybujících se částí  $m_p$  (píst + jezdec) je uváděna v katalogu a konkrétně pro tuto jednotku DPGL je  $m_p \approx 0,58 [kg]$ .

Volba součinitelů  $\alpha, \alpha_{pri}, \alpha_{odv}$ , nacházejících se v rovnici (22), (25) a (26). Nastavováním uvedených součinitelů v rozmezí 1 až  $\kappa$  lze libovolně měnit průběh termodynamického děje. Při volbě hodnot parametrů, budeme vycházet z lit. [12]. To znamená, že součinitel  $\alpha_{priv}$  nastavíme na odpovídající hodnotu adiabatického exponentu  $\kappa$ ;  $\alpha_{priv} = \kappa$ . Součinitel  $\alpha_{odv} = 1$  a součinitel  $\alpha = 1,2$ . Tato hodnota byla zjištěna empiricky porovnáním dynamického chování modelu s reálným systémem [12].

### Výpočet mrtvého objemu vzduchu $V_0$

Mrtvý objem vzduchu ve válci se skládá z objemu vzduchu, který je v přívodním vedení k válci a též z objemu vzduchu, který zůstává ve válci, když čelo pístu dojde do krajní pozice a před ním je ještě část válce, kam se nedostane (většinou tam bývá vstup/výstup tlakového vzduchu).

Válec budeme považovat za symetrický  $V_0 = V_{0A} = V_{0B}$ .

Přívodní vedení mělo délku přibližně 0,75 m a průměr 0,009 m.

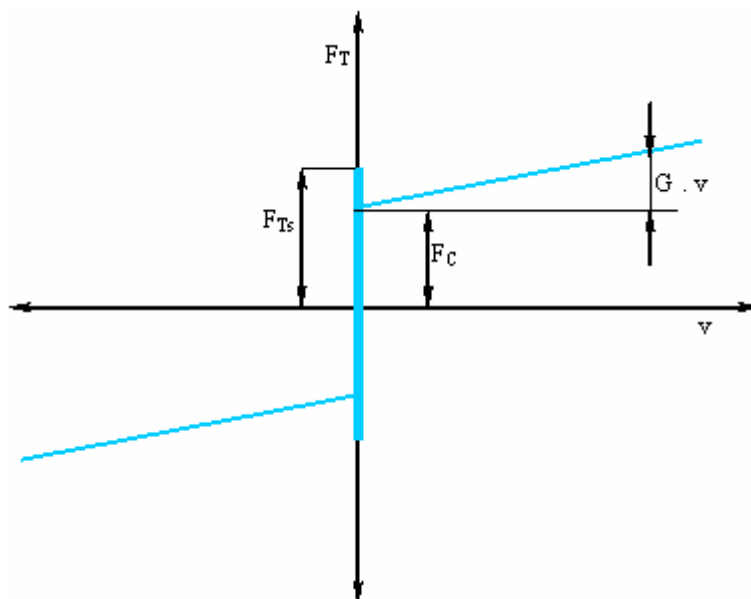
Délka válce, kam se píst nedostane, by se dala přibližně vzít z délky nastavitelného tlumení, což u jednotky DPGL-32-500-PPV-A-B-KF-SH-D2 je 0,020 m.

$$V_0 = \frac{\pi \cdot 0,009^2}{4} \cdot 0,75 + \frac{\pi \cdot 0,032^2}{4} \cdot 0,020 \approx 6,4 \cdot 10^{-5} [m^3] \quad (47)$$

#### 5.2.1.2. Třecí síly v lineární pneumatické jednotce DGPL

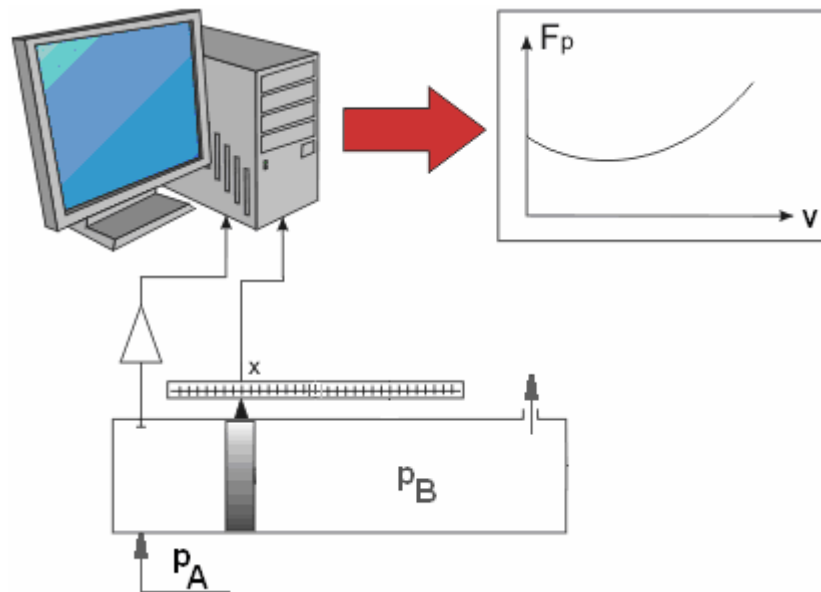
Při vzájemném kontaktu a pohybu dvou povrchů vzniká tečná reakční síla mezi oběma kontaktními povrchy. Tato reakční síla je výsledkem mnoha různých dílčích mechanismů, závislých na topografii a geometrii kontaktu, materiálových vlastnostech, mazání posuvu a rychlosti.

Tření je známé svým nelineárním chováním. Typickým představitelem takového nelineárního chování je slick-slip efekt. Jedná se o trhavý pohyb, ke kterému dochází při nízkých rychlostech pohybu. Tento efekt způsobuje problémy při řízení pneumotorů. Na velikost tření má vliv také směr pohybu. Na Obr. 5.5 je klasický model tření, který umožňuje současně uvažovat viskózní i statické tření.



Obr. 5.5: Klasický model tření

Tření pístového a pístnicového těsnění, které je závislé na rychlosti pohybu pístu, je důležitou veličinou pro pohybové vlastnosti pneumatického mechanismu. Snižuje také účinnost systému, způsobuje trhaný pohyb při rozběhu a doběhu pohonu a ovlivňuje přesnost nastavování poloh pneumatických polohovacích systémů. Třecí síla závisí na konstrukci a geometrii těsnicích hran těsnění, na mazacích a zatěžovacích poměrech a době, po kterou těsnění již bylo v provozu nebo bylo v klidu. Třecí síly představují nelineární faktor, ovlivňují chování pneumatik a k jejich zjištění je třeba experimentu. Měření se provádí tak, že je zjišťována třecí síla v závislosti na rychlosti pístu pneumatiku a na tlakové diferenci na pístu.



Obr. 5.6: Schématické zapojení pro měření třecích vlastností v závislosti na rychlosti pohybu pístu

Při měření docházelo ke snímání hodnot tlaku a polohy válce. Tlak ve ventilu se nastavil ručně, pomocí digitálního manometru PIAB VCU-J2. Válec se zajistil v krajní poloze, poté došlo k nastavení požadovaného tlaku. Pak došlo k uvolnění válce. Následně, po počátečním mírném poklesu tlaku ve válci, se píst pohyboval konstantní rychlostí. Z toho bylo možno určit velikost třecí síly. K experimentu byla využívána měřicí karta National Instruments DAQ 6024E. K určení síly při utržení (statické tření) bylo využito digitálního siloměru IMADA DPX-ST. Rychlost pístu byla získána derivováním měřeného posuvu pístu podle času.

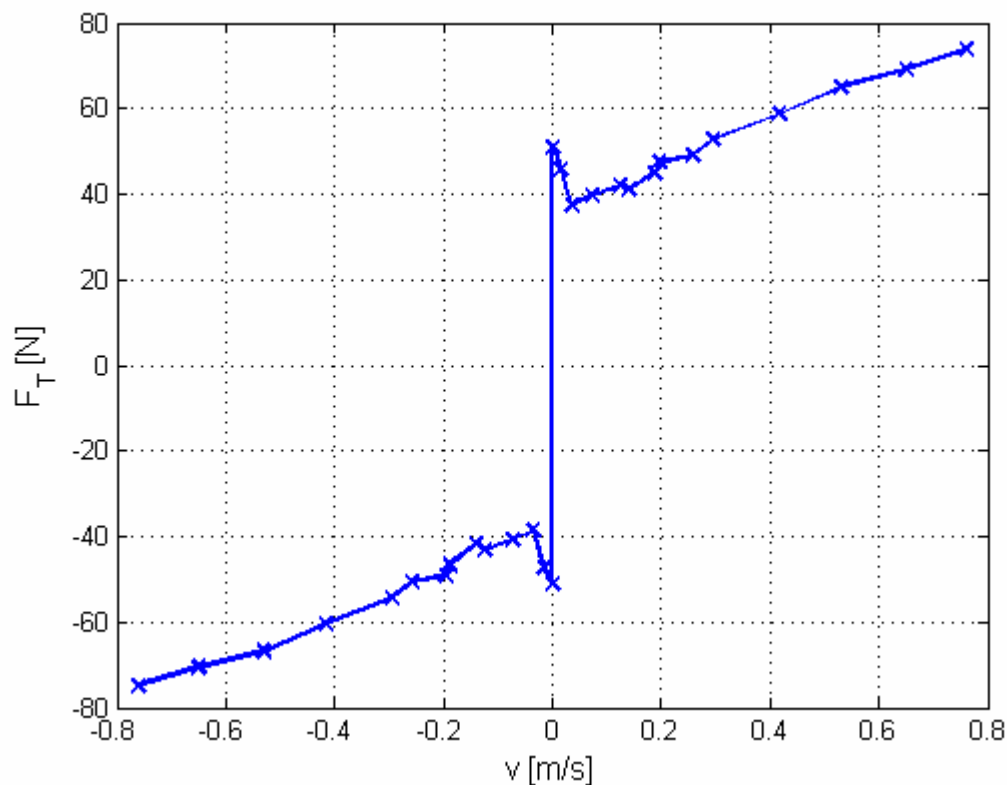
Úpravou pohybové rovnice pístu, rov. (11), dosazení za  $\ddot{x} = 0; F_z = 0; m_z = 0$ ; (zrychlení, externí zatížení pístu a přídavná hmotnost jsou nulové) a vyjádřením třecí síly dostaneme:

$$F_T = S \cdot (p_A - p_B) \quad (48)$$

- $F_T$  - celková třecí síla působící na pístu a pístnici;
- $p_A, p_B$  - tlaky v pracovních prostorech válce A,B;
- $S$  - plochy čel pístu (obě stejné).

Jelikož tlak  $p_B$  je tlak atmosférický, pak digitální manometr PIAB VCU-J2 ukazuje přímo rozdíl tlaků  $p_A - p_B$ .

Zjištěná závislost třecí síly  $F_T$  na rychlosti lineární pneumatické jednotky DPGL-32-500-PPV-A-B-KF-SH-D2 od fy. Festo je znázorněna na Obr. 5.7.



Obr. 5.7: Zjištěná závislost třecí síly na rychlosti

Z Obr. 5.7 je patrné, že třecí síla  $F_T$  má přibližně přímkový charakter a lze použít matematický model zobrazený na Obr. 5.5.

Závislost třecí síly na vstupních veličinách je definována logickým zápisem:

Jestliže	$v = 0$	$a \text{ } \text{abs}(F_P) \leq F_{Ts} \text{ je } F_T = F_P$ $a \text{ } F_P > F_{Ts} \text{ je } F_T = F_{Ts}$ $a \text{ } F_P < -F_{Ts} \text{ je } F_T = -F_{Ts}$	(49)
Jestliže	$v > 0$	je $F_T = (F_C + G \cdot \text{abs}(v))$	
Jestliže	$v < 0$	je $F_T = -(F_C + G \cdot \text{abs}(v))$	

Odečtené charakteristické body třecí síly podle Obr. 5.5, využitě v simulačním schématu Obr. 5.17.

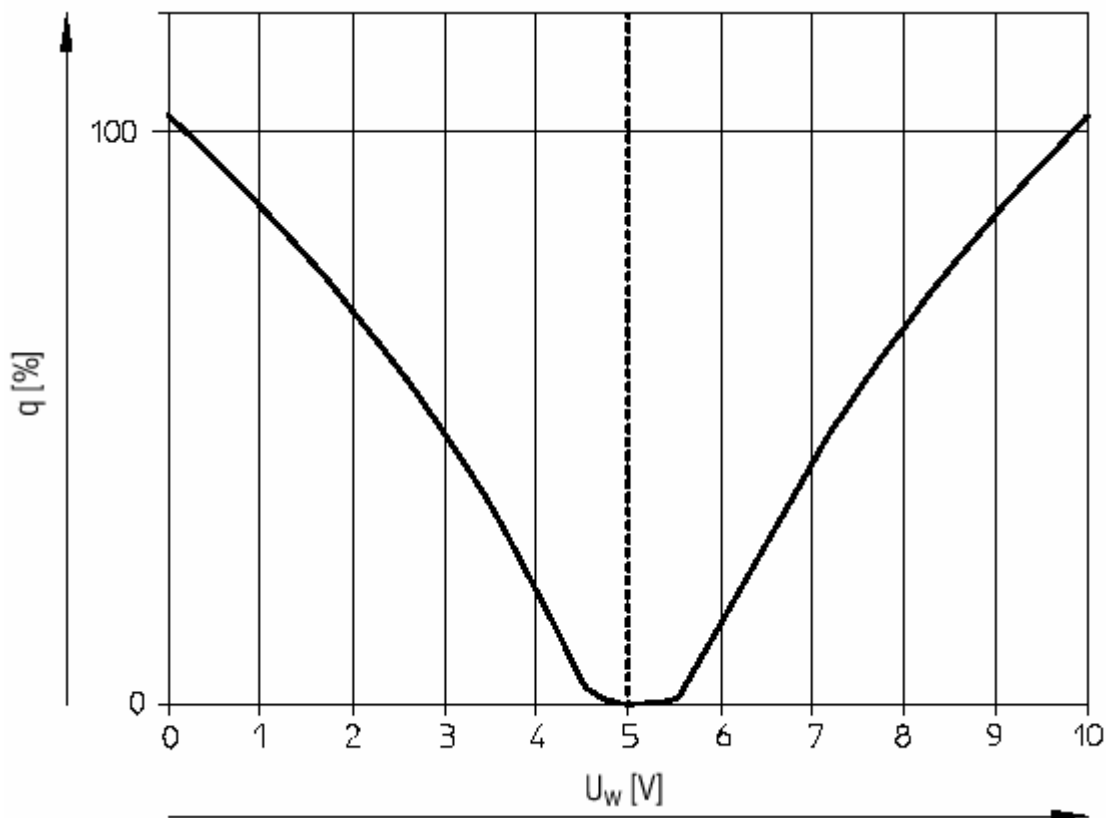
- Coulombovo tření  $F_C \approx 35[N]$ ;
- koeficient viskózního tření  $G \approx 56[N \cdot s / m]$ ;
- statické tření  $F_{TS} \approx 51[N]$ ;
- $v[m / s]$  - rychlost pohybu pístu;
- $F_p[N]$  - síla působící na píst od tlaku vzduchu ve válci.

Podrobnější přehled vlastností lineární jednotky DPGL jsou uvedeny v Příloha č.1.

### 5.2.2. Proporcionální ventil MPYE

Pneumatický ventil MPYE-5-1/8-HF-010-B je 5/3 cestný ventil. Jde o spojitě ovládaný pěticestný rozvaděč s uzavřenou střední polohou. Hlavní část ventilu tvoří šoupátko, vyrobené z keramiky a uložené v keramickém pouzdře. Šoupátko je bez těsnících prvků a uložení má přesně vymezené vůle, takže nemůže dojít k jeho zadření vlivem pracovních podmínek. V části, ve které je umístěn elektromagnet, je současně umístěno bezkontaktní snímání polohy šoupátka. V hlavici je dále vnitřní elektronický regulační obvod, který porovnává skutečnou polohu šoupátka s polohou žádanou a na základě těchto údajů zpětnovazebně polohu šoupátka upravuje. Účinně se tím zamezuje vzniku nepříznivého kmitání. Požadovaná poloha je zadávána ve formě napětí přivedeného na vstupní konektor. Velikost řídicího signálu se pohybuje v intervalu 0 až 10V. Při hodnotě 5V se šoupátko nachází ve střední poloze, ventil je uzavřen. Při napětí 0V nebo 10V je šoupátko v jedné z krajních poloh, dochází k úplnému otevření ventilu. Díky vnitřní zpětné vazbě je dosahováno vysoké přesnosti polohy šoupátka, jehož hystereze tvoří nejvýše 0,3% z celého zdvihu. Ventil má vysokou životnost, dosahovanou díky keramickému materiálu na pohyblivé části a vysokou rychlost (zaručený čas pro přestavění je okolo 5 ms). V praxi je možné dosáhnout mezní frekvence 100Hz (útlum -3dB) při pohybu mezi 20 - 80 % otevření (Obr. 5.9).

Maximální průtok vzduchu ventilem MPYE-5-1/8-HF-010-B je 700 l/min při jmenovitém napájecím tlaku 6 bar. Maximální tlak je 10 barů. Průtoková charakteristika vyjadřující závislost průtoku vzduchu ventilem na řídicím elektrickém napětí je uvedena na Obr. 5.8.



Obr. 5.8: Průtoková charakteristika ventilu MPYE-5-1/8-HF-010-B

- $U_w$  - řídicí napětí na ventilu
- $q$  - procentuelní průtok vzduchu ventilem

### 5.2.2.1. Dynamika pneumatického ventilu

Výslednou dynamiku otevření ventilu lze dostatečně přesně popsat pomocí proporcionálního členu se setrvačností 2. řádu (kapitola 4.2.2). Poloha šoupátka je modelována v závislosti na řídicím napětí  $u$  pomocí diferenciální rovnice (27).

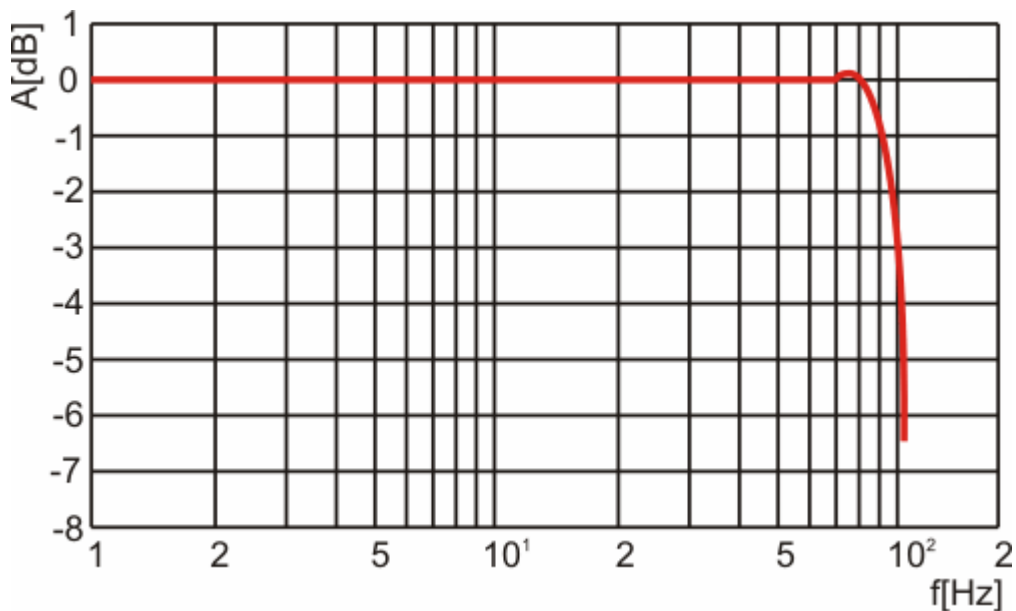
Katalog fy. Festo uvádí pro ventil MPYE-5-1/8-HF-010-B.

- Mezní frekvence 100 Hz;
- součinitel poměrného tlumení  $\xi_{sv} \approx 0,6$ .

$$T_{sv} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100} \quad (50)$$

- $T_{sv}$  - časová konstanta ventilu [s];
- $\xi_{sv}$  - poměrné tlumení ventilu [-];
- $x_s$  - posunutí šoupátka ventilu [m].

Tlumení bylo určeno tak, aby následná simulační charakteristika odpovídala charakteristice, kterou udává výrobce.



Obr. 5.9: Frekvenční charakteristika ventilu MPYE, lit [16]

#### 5.2.2.2. Průtoková plocha ventilu

V kapitole 4.2.3 byly odvozeny rovnice (38) až (46) pro výpočet velikosti průtokové plochy v závislosti na poloze šoupátka. Při výpočtu je nutné znát geometrické rozměry těch součástí ventilu, které se podílejí na velikosti uvedené plochy. Pro plochu tvaru válcové štěrbiny je to  $\varnothing D_v$  a šířku překryvné části šoupátka  $h_s$ .

Jedním ze způsobů, jak získat velikosti průtokové plochy, je její výpočet z průtokové charakteristiky ventilu, která je uvedena v dokumentaci výrobce. Na Obr. 5.8 je uveden průtok  $q$  [%] pro ventil MPYE-5.



Průtoková charakteristika byla měřena při napájecím tlaku (přetlaku) 0,6 MPa (z katalogu), na výstupu byl přetlak 0,5 MPa. Absolutní tlak na vstupu byl 0,7 MPa a na výstupu 0,6 MPa. Ověření charakteristiky bylo provedeno v lit. [17].

Poměr tlaků:

$$\beta = \frac{p_d}{p_h} = \frac{0,6}{0,7} = 0,857 \quad (51)$$

$$\beta > \beta_{kit} = 0,528 \text{ (dochází k podkritickému proudění vzduchu)} \quad (52)$$

Při tomto poměru je hmotnostní průtok vzduchu otvorem ventilu dle rovnice (33).

$$\begin{aligned} \dot{m}_v &= \mu \cdot A_v \cdot K_2 \cdot \frac{p_h}{\sqrt{T}} \cdot \left( \frac{p_d}{p_h} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{p_d}{p_h} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \Rightarrow \dots \\ A_v &= \frac{\dot{m}_v}{\mu \cdot K_2 \cdot \frac{p_h}{\sqrt{T}} \cdot \left( \frac{p_d}{p_h} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{p_d}{p_h} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}} \end{aligned} \quad (53)$$

Vyjádříme hmotnostní průtok pomocí objemového s využitím stavové rovnice ideálního plynu:

$$\dot{m}_v = \rho \cdot \dot{V}_v = \frac{p_h}{r \cdot T} \cdot \dot{V}_v \quad (54)$$

Dosazení rovnice (54) do (53) dostaneme:

$$A_v = \frac{\frac{p_h}{r \cdot T} \cdot \dot{V}_v}{\mu \cdot K_2 \cdot \frac{p_h}{\sqrt{T}} \cdot \left( \frac{p_d}{p_h} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{p_d}{p_h} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}} \quad (55)$$

➤  $K_2$  - výpočtem z rovnice (35) je  $K_2 = 0,156174$ ;

- $T$  - teplota proudícího vzduchu průtokovým otvorem;
- $r$  - individuální plynová konstanta, pro vzduch je  $r = 287$ ;
- $\dot{V}_v$  - objemový průtok vzduchu protékající ventilem;
- $\mu$  - součinitel ztrát má hodnotu 1 a ztráty se zahrnou do velikosti průtokové plochy  $A_v$ .

Katalog fy. Festo uvádí pro ventil MPYE-5-1/8-HF-010-B

- Jmenovitý průtok  $q = 100[\%] \Rightarrow 700[l/min]$  při napájecím tlaku (přetlaku) 6 barů při teplotě  $T \approx 20 + 273,15[K]$ .

Dosazením do rovnice (55):

$$A_v = \frac{700 \cdot 0,7 \cdot 10^6}{60 \cdot 1000 \cdot (20 + 273,15) \cdot 287} \cdot \frac{1}{1 \cdot 0,156174 \cdot \frac{0,7 \cdot 10^6}{\sqrt{(20 + 273,15)}} \cdot \left(\frac{0,6 \cdot 10^6}{0,7 \cdot 10^6}\right)^{1,4}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,6 \cdot 10^6}{0,7 \cdot 10^6}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}}} \quad (56)$$

$$A_v \approx 8,1763 \cdot 10^{-5} [m^2] \quad (57)$$

Z průtokové plochy  $A_v$  můžeme spočítat šířku drážky  $h_d$ :

$$A_v = h_d \cdot \pi \cdot D_v \Rightarrow h_d = \frac{A_v}{\pi \cdot D_v} = \frac{8,1763 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot 11 \cdot 10^{-3}} \approx 2,4 [mm] \quad (58)$$

Z porovnání simulace průtokové charakteristiky a katalogových údajů byla zvolena šířka překryvné části přibližně  $h_s \approx 3 [mm]$  (Tato hodnota byla konzultována s pracovníky fy. Festo)

Podrobnější přehled vlastností ventilu MPYE jsou uvedeny v části Příloha č.2.

### 5.2.3. Regulátor koncových poloh SPC11

Regulátor koncových poloh SPC11 umožňuje kromě pojíždění mezi dvěma mechanickými pevnými dorazy (Pos\_A, Pos\_B) také najíždění do dvou mezipoloh

(Pos\_C, Pos\_D), Obr. 5.10. Přesnost mezipoloh je  $\pm 0,25\%$  z celkové délky zdvihu, minimálně však  $\pm 2$  mm. Do paměti regulátoru jsou uloženy pozice (A, B, C, D) a může uživatel libovolně vybírat pozice, do kterých bude pneumatický pohon najíždět. Typické příklady použití mezipoloh jsou vyčkávací polohy nebo vyfukovací polohy, u nichž není nutná velká přesnost. Mezipolohu lze také využít jako čidlo. Tzn. při přejetí takové mezipolohy je na odpovídající výstup odeslán signál log. „1“ po dobu 50 ms.



Obr. 5.10: Zobrazení pozic na pneumatickém válci

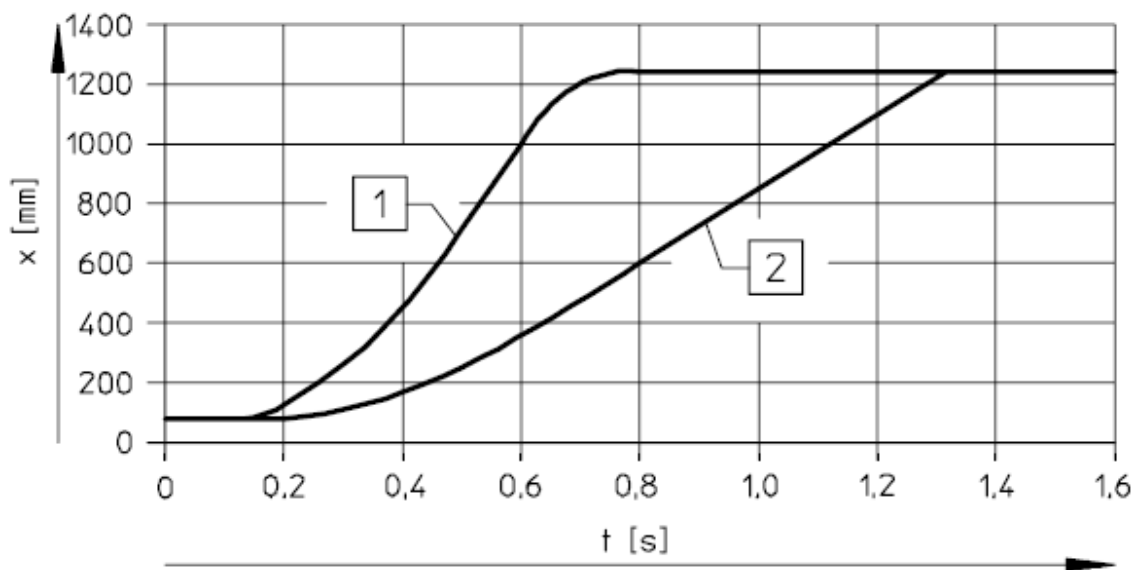
### Funkce učení se

Automatické koncových poloh (*Pos\_A*, *Pos\_B*) se spouští tlačítkem na regulátoru koncových poloh SPC11 nebo externě připojeným ovládacím kabelem (např. z řídicího systému).

Výhody při zapojení regulátoru SPC11:

- Dochází k podstatnému omezení otřesů a nárazů v koncových polohách;
- pohyb je optimální i při změnách hmotnosti či zátěže až do 30 % celkové pohybující se hmotnosti;
- lze dosáhnout až o 30 % více pohybů;
- výrazné snížení hluku.

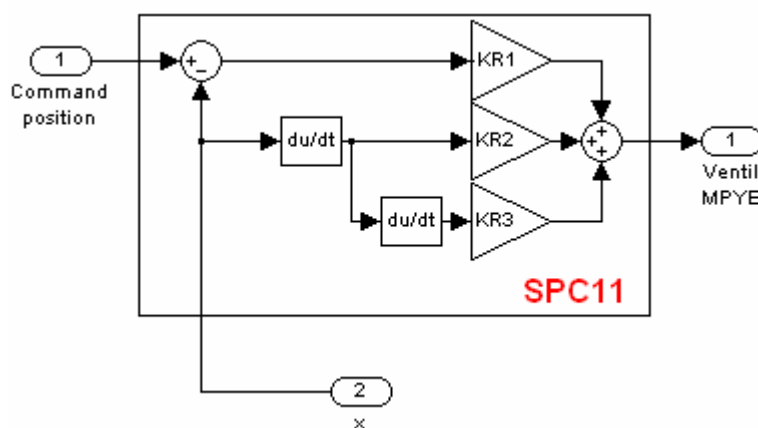
Na Obr. 5.11 je patrný rozdíl polohy v závislosti na čase při použití pohonu s elektronickým regulátorem koncových poloh SPC11 (pos. 1) oproti pohonu s tlumičem nárazu (pos. 2). Graf platí pro následující příklad: DGPL-25-1250-PPV-A-KF-B-GK-D2, pohybující se hmotnost 12 kg.



Obr. 5.11: Porovnání zapojení pneumatického pohonu

- $x$  [mm] – zdvih,
- $t$  [s] – čas.

Vnitřní strukturu regulátoru SPC11 (bez učící se složky) lze nahradit stavovým regulátorem dle Obr. 5.12 (lit. [15]). Do regulátoru vstupuje povel (Command position), kterým se vybírá jedna z uložených poloh v paměti a dále skutečná poloha pístu ( $x$ ). V regulátoru je poloha derivována na rychlost a druhá derivace na zrychlení.



Obr. 5.12: Vnitřní struktura regulátoru SPC11

Při změně hmotnosti je nutné změnit nastavení regulátoru (změnit konstanty  $KR1$ ,  $KR2$ ,  $KR3$ ), aby výsledný pohyb byl aperiodický, tzn. nedocházelo k překmitům

systemu a následným rázům. V katalogu fy. Festo je k dispozici tabulka, viz. Tab. 5.1, dle které se konfiguruje regulátor.

Mass [kg]	DGPL – 32 - 500			
	MPYE -5-1/8-HF-010B			
	Amplification stage	Cushioning stage	System parameter	Time [s]
0-3	14	18	23	0,57
3-6	17	20	23	0,60
6-9	18	23	23	0,67
9-12	19	25	23	0,68
12-15	20	25	23	0,70
15-18	21	26	23	0,72
18-21	22	27	23	0,69
21-24	22	30	23	0,78
24-27	23	28	23	0,74
27-30	23	30	23	0,75
30-33	23	30	23	0,79
33-36	24	30	23	0,79
36-39	24	31	23	0,83
39-42	24	32	23	0,82
42-45	25	31	23	0,80

Tab. 5.1: Zadávané parametry do SPC11 dle fy. Festo

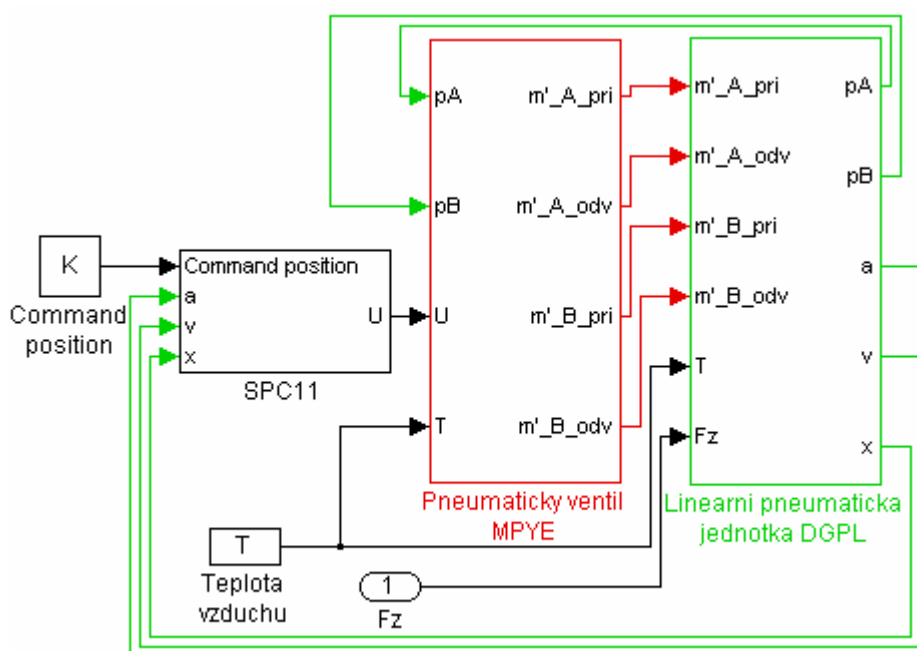
Zadávané parametry do regulátoru SPC11, dle Tab. 5.1, neodpovídají konstantám  $KR1, KR2, KR3$  v simulačním schématu (Obr. 5.12). Pro správnou simulaci bylo nutné tyto konstanty identifikovat. Popis nalezení konstant je popsán v kapitole 5.3.3.1. Každé sadě konstant podle Tab. 5.1 regulátoru SPC11, odpovídají v simulačním schématu pokaždé jiné konstanty ( $KR1, KR2, KR3$ ) a ty se musí identifikovat podle kapitoly 5.3.3.1, aby následné simulace odpovídaly měřením.

Podrobnější přehled vlastností regulátoru SPC11 jsou uvedeny v Příloha č.3

### 5.3. Sestavení simulačního modelu

V kapitolách 4.2.1, 4.2.2 a 4.2.3 byly odvozeny diferenciální a algebraické rovnice popisující chování jednotlivých částí pneumatického systému. K jejich namodelování a simulacím slouží program Matlab – Simulink.

V následujících částech bude proveden podrobnější popis simulačních schémat, s vysvětlením jejich funkce a činnosti.



Obr. 5.13: Kompletní simulační schéma pneumatického systému

Na Obr. 5.13 je uvedeno kompletní schéma pneumatického obvodu, které obsahuje subsystémy:

- regulátor SPC11;
- pneumatický ventil MPYE;
- lineární jednotka DGPL.

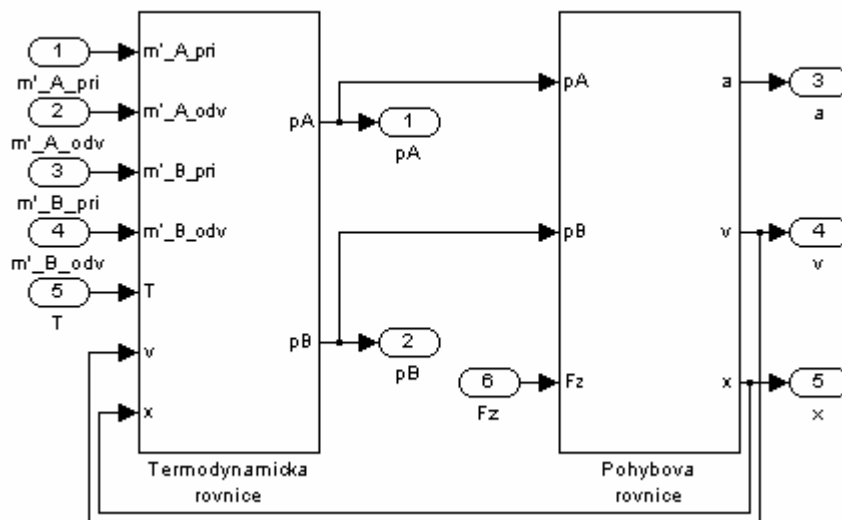
Jako externí vstupy do subsystémů jsou přivedeny teplota vzduchu, vnější zatěžující síla ( $F_z$ ) a žádaná hodnota polohy (Command position).

Z Obr. 5.13 je též patrné, že jako vstupní parametry do subsystému regulátoru SPC11 jsou přiváděny poloha, rychlost a zrychlení pístu. Při numerické derivaci polohy

(v simulačním schématu) by docházelo k nepřesnostem, které by následně výrazně ovlivnily výpočet dalších veličin. Do skutečného regulátoru je přiváděna pouze poloha a derivacemi se získává rychlost a zrychlení. V regulátoru je ještě řada filtrů, které derivovaný signál vyhlazují a dále upravují. V simulačním schématu nejsou filtry zohledněny.

### 5.3.1. Simulační schéma lineární pneumatické jednotky DGPL

Simulační schéma na Obr. 5.14 obsahuje ještě dva subsystémy, v nichž jsou namodelovány rovnice (11) (pohybová rovnice pístu) a rovnice (25) a (26) (diferenciální rovnice pro tlak vzduchu v pracovních prostorech válce).



Obr. 5.14: Simulační subsystémy lineární jednotky DGPL

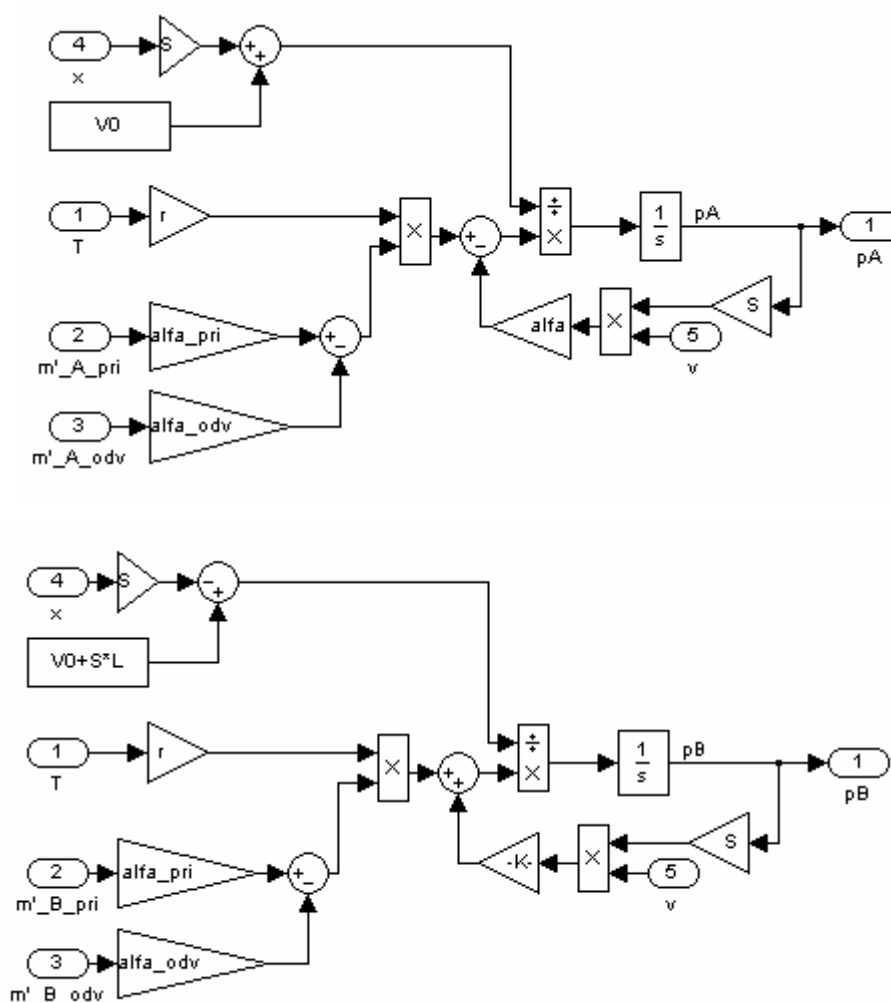
Vstupujícími parametry do subsystémů na Obr. 5.14 jsou:

- $m'_A\_pri$  /  $m'_A\_odv$  - přiváděný / odváděný hmotnostní tok vzduchu do pracovního prostoru válce označeného „A“;
- $m'_B\_pri$  /  $m'_B\_odv$  - přiváděný / odváděný hmotnostní tok vzduchu do pracovního prostoru válce označeného „B“;
- $T$  - teplota vzduchu;
- $F_z$  - externí zatěžující síla.

Vystupujícími parametry ze subsystémů na Obr. 5.14 jsou:

- $x, v, a$  - poloha, rychlost, zrychlení pístu;
- $pA, pB$  - okamžitý tlak v prostorech válce „A“, „B“.

Na Obr. 5.15 je již zobrazeno konkrétní simulační schéma pro rovnice (25) a (26) (termodynamické rovnice). Standardně zakreslené simulační schéma. Počáteční hodnoty tlaků v pracovních prostorách („A“, „B“) válce jsou zadávány přímo do bloků integrátorů (ve schématu označené  $\frac{1}{s}$ ).



Obr. 5.15: Simulační schéma pro rovnice (25) a (26)

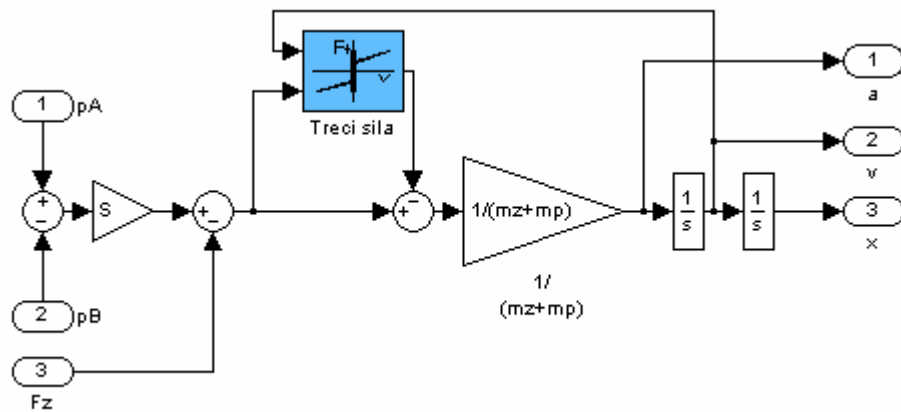
Tlaky  $pA$  a  $pB$  vystupující ze simulačního schématu jsou přivedeny jako vstupní parametry do subsystémů „*Pohybova rovnice*“ a „*Pneumaticky ventil MPYE*“.



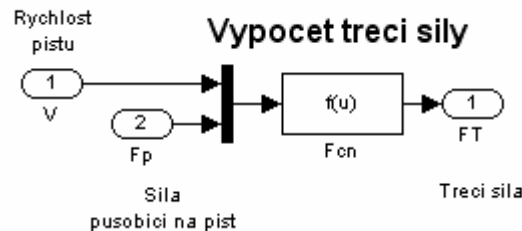
Na Obr. 5.16 je již zobrazeno simulační schéma pro diferenciální rovnici 2. řádu (11), je zde přidán blok „Treci sila“, ve kterém je zapsána třecí funkce, rovnice (59). Zjednodušeně by se dala funkce bloku „Treci sila“ popsat následovně:

Do bloku „Treci sila“ vstupují rychlost a síla od tlakového vzduchu působícího na píst, ze kterých se určí velikost třecí síly (rovnice (49)). Vypočítaná třecí síla se odečte od síly vytvářené tlakem vzduchu ( $F_P$ ) a dostaneme zrychlující sílu pístu.

Počáteční poloha pístu se též zadává přímo do bloku integrátoru.



Obr. 5.16: Simulační schéma pro rovnici (11)



Obr. 5.17: Zobrazení subsystému „Treci sila“

Do zadávacího okna bloku  $Fnc$  podle výše zmíněné úvahy (49) napíšeme následující posloupnost:

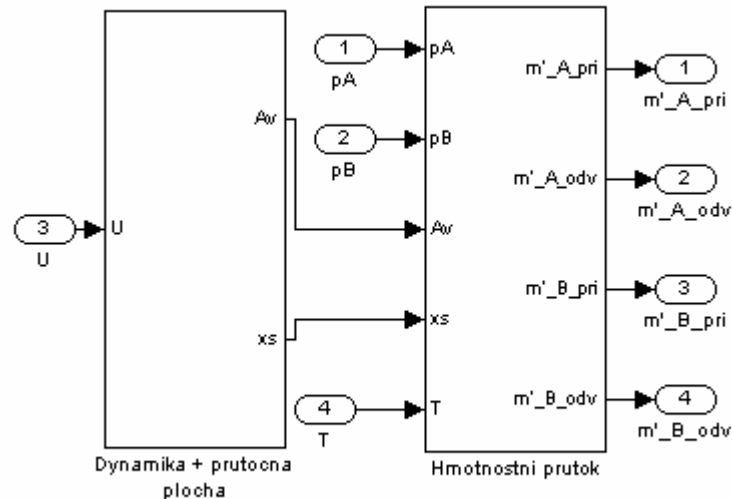
$$(u[1]==0)*((abs(u[2])<=FTs)*u[2]+(u[2]>FTs)*(FTs)+(u[2]<-FTs)*(-FTs))+ \\ +(u[1]>0)*(Fc+G*abs(u[1]))+(u[1]<0)*(-Fc-G*abs(u[1])) \quad (59)$$

- $u[1]$  značí první veličinu vstupující do bloku – rychlost  $v$ ;
- $u[2]$  značí druhou veličinu vstupující do bloku – sílu  $F_P$ .

Ze simulačního schématu (Obr. 5.16) vystupují stavové parametry (zrychlení, rychlost, poloha) použité v dalších subsystémech (regulátor SPC11, atd.).

### 5.3.2. Simulační schéma proporcionálního ventilu MPYE

Simulační schéma na Obr. 5.18 se skládá ze dvou subsystémů. V prvním subsystému „*Dynamika + prutocna plocha*“ jsou namodelovány rovnice (27), (38), (39) a (40). V druhém subsystému „*Hmotnostni prutok*“ jsou namodelovány rovnice (32) a (33). Sestavení simulačního schématu pro ventil MPYE je poměrně složité, neboť je zde několik rozhodovacích kritérií, které je potřeba dodržet pro správnou funkci celého subsystému.



Obr. 5.18: Zapojení subsystémů ventilu MPYE

Do subsystémů vstupují parametry:

- $U$  - řídicí napětí z regulátoru SPC11;
- $pA, pB$  - okamžitý tlak v prostorech válce „A“, „B“;
- $T$  - teplota vzduchu ve ventilu.

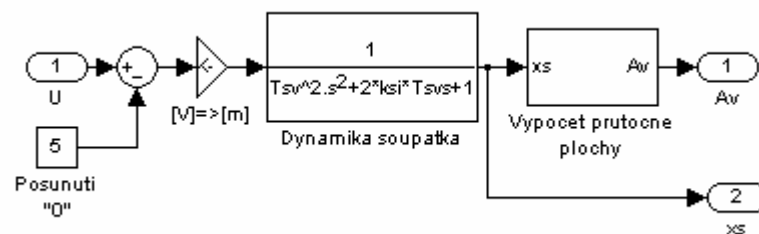
Vystupující parametry:

- $m'_A_{pri} / m'_A_{odv}$  - přiváděný / odváděný hmotnostní tok vzduchu do pracovního prostoru válce označeného „A“,
- $m'_B_{pri} / m'_B_{odv}$  - přiváděný / odváděný hmotnostní tok vzduchu do pracovního prostoru válce označeného „B“.

### 5.3.2.1. Simulační schéma subsystému „Dynamika + prutocna plocha“

Veškerá činnost subsystémů ventilu („Dynamika + prutocna plocha“ a „Hmotnostni prutok“) je odvislá od přicházejícího řídicího napětí „ $U$ “ (0 až 10 V), které je určující pro směr a velikost posunutí šoupátka ventilu a z toho vyplývající hmotnostní průtok vzduchu do válce.

Vstupní signálem do Obr. 5.19 je řídicí napětí  $u$  z regulátoru SPC11. Protože uzavřený ventil  $x_s = 0$  je právě při  $U = 5V$  (Obr. 5.8 manuál fy. Festo), odečte se 5V od  $U$ , z důvodu lepší práce s takto upraveným signálem v simulačním schématu. Po odečtení je  $x_s = 0$  pro 0V. Další blok „ $[V] \Rightarrow [m]$ “ převádí přivedené napětí  $u$  na žádanou hodnotu posunutí šoupátka. V bloku „ $[V] \Rightarrow [m]$ “ je zapsán výraz:  $(h_d/2 + h_s/2)/5$  znamenající, že při upraveném napětí (z max. 10V je odečteno 5V a výsledek je 5V) bude na ventilu max. vychýlení šoupátka  $(h_d/2 + h_s/2)$  a tím max. průtok vzduchu ventilem.



Obr. 5.19: Vnitřní zapojení subsystému „Dynamika + prutocna plocha“

Podle frekvenční charakteristiky, (Obr. 5.9) bylo nutné vytvořit přenos s časovou konstantou  $T_{sv} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100}$  (upravená rovnice (27)) a poměrným tlumením  $\xi_{sv} = 0,6$ .

Výsledný přenos rov. (60) byl zapsán do bloku „*Dynamika soupátka*“ a jeho frekvenční charakteristika odpovídá Obr. 5.9.

$$F = \frac{1}{T_{sv}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_{sv} \cdot s + 1} \quad (60)$$

Signál  $x_s$  vystupující z bloku „*Prenos soupátka*“, je skutečné posunutí šoupátka a z něho se vypočítá velikost průtočné plochy a hmotnostní průtok vzduchu.

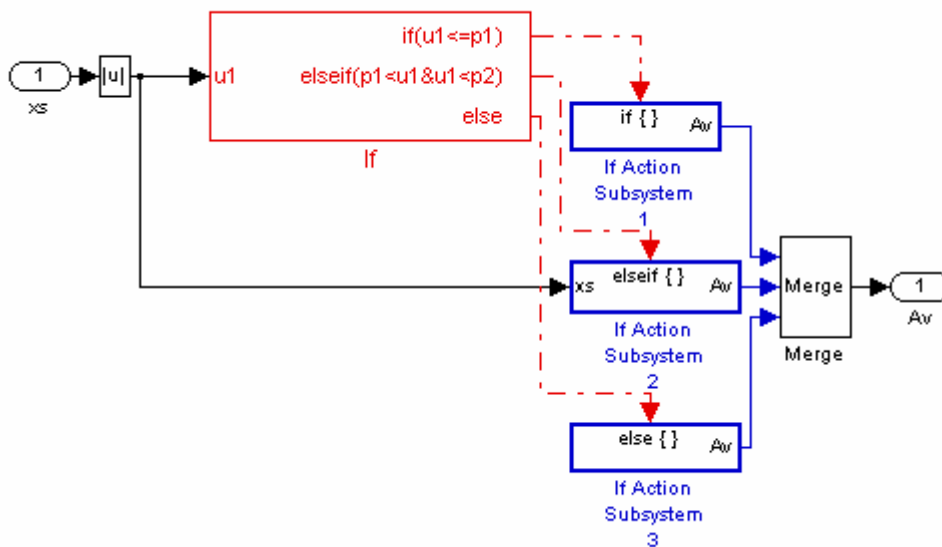
Na Obr. 5.20 je zobrazeno vnitřní zapojení subsystému „Vypocet prutocne plochy“ odpovídající rovnicím (38), (39) a (40). V literaturách ([8], [12], [14]), kde jsou uvedeny simulační schémata pneumatických ventilů, se při rozhodovacích procesech používají bloky „Switch“ a ty činí schémata často nepřehlednými. Proto v této části bude ukázána alternativní možnost použitím simulinkových bloků „*If =>If Action Subsystem=>Merge*“, pro rozhodovací úrovně.

Vstupující parametr do subsystému na Obr. 5.20 jsou:

- $x_s$  - posunutí šoupátka ventilu

Vystupující parametry ze subsystému na Obr. 5.20 jsou:

- $A_v$  - průtoková plocha ventilu



Obr. 5.20: Vnitřní zapojení subsystému „Vypocet prutocne plochy“

Podle kapitoly 4.2.3 jsou 3 režimy otevření ventilu:

1.  $|x_s| \leq \frac{1}{2}(h_s - h_d)$  - ventil uzavřený (rov. (38))
2.  $\frac{1}{2}(h_s - h_d) < |x_s| < \frac{1}{2}(h_s + h_d)$  - ventil částečně otevřený (rov. (39))
3.  $|x_s| \geq \frac{1}{2}(h_s + h_d)$  - ventil úplně otevřen (rov. (40))

Byly vytvořeny 2 pomocné proměnné „ $p1$ “ a „ $p2$ “, pro lepší možnost testování mezních situací (přechod z uzavřeného na otevřený ventil).

$$p1 = \frac{1}{2}(h_s - h_d), \text{ (podmínka z rov. (38))} \quad (61)$$

$$p2 = \frac{1}{2}(h_s + h_d), \text{ (podmínka z rov. (40))} \quad (62)$$

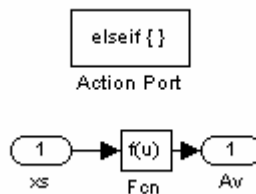
### Funkce bloku „If“

ad 1. Jestliže bude platit podmínka „ $u_1 < p_1$ “ (ventil uzavřen, rov. (38)) blok „If“ vybere blok „If Action Subsystem 1“ (propojení červenou čerchovanou čarou), provede se simulace, která je uvedena uvnitř bloku „If Action Subsystem 1“. Pro naši podmínku „ $u_1 < p_1$ “ platí rov. (38), tzn. že výstup bloku „If Action Subsystem 1“ bude „0“ ( $A_v = 0$ ), Obr. 5.21.



Obr. 5.21: Vnitřní zapojení bloku „If Action Subsystem 1“ z Obr. 5.20, rovnice (38)

ad 2. Jestliže bude platit podmínka „ $p_1 < u_1 \& u_1 < p_2$ “ (ventil částečně otevřený, rov. (39)), blok „If“ vybere blok „If Action Subsystem 2“ (propojení červenou čerchovanou čarou) a provede se simulace, která je uvedena uvnitř bloku „If Action Subsystem 2“. Pro naši podmínku „ $p_1 < u_1 \& u_1 < p_2$ “ platí rov. (39), tzn. že výstup bloku „If Action Subsystem 2“ bude podle rov. (39), Obr. 5.22:



Obr. 5.22: Vnitřní zapojení bloku „If Action Subsystem 2“ z Obr. 5.20, rovnice (39)

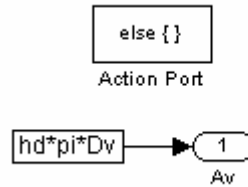
V bloku „Fcn“ je zapsána (příkazy Matlabu – Simulinku) funkce podle rovnice (39):

$$(u(1) - 1/2 * (h_s - h_d)) * \pi * D_v$$

➤  $u(1)$  – vstupní signál  $x_s$  (poloha šoupátka).

ad 3. Jestliže nebude platit ani jedna podmínka „ $u_1 < p_1$ “, „ $p_1 < u_1 \& u_1 < p_2$ “, pak platí rov. (40) a blok „If“ automaticky vybere blok „If Action Subsystem 3“

(propojení červenou čerchovanou čarou). Provede se simulace, která je uvedena uvnitř bloku „*If Action Subsystem 3*“, v našem případě je to rov. (40), Obr. 5.23:



Obr. 5.23: Vnitřní zapojení bloku „*If Action Subsystem 3*“ z Obr. 5.20, rovnice (40)

Podmínka 3. nastává pouze pro  $|x_s| = \frac{1}{2}(h_s + h_d)$ , neboť není možné víc otevřít šoupátko.

Ve všech třech případech je  $u1 \equiv |x_s|$ .

Funkce bloku „*Merge*“

V Obr. 5.20 je zapojený blok „*Merge*“, bez něhož by simulace nefungovala. Blok „*Merge*“ rozpozná, který subsystém („*If Action Subsystem 1*“, „*If Action Subsystem 2*“, „*If Action Subsystem 3*“) je právě vybraný pomocí bloku „*If*“ (červená čerchovaná čára). Signál z vybraného „*If Action Subsystem*“ a propustí dál do simulačního schématu k dalšímu zpracování.

Pozn.: Není možné do bloku „*If*“ místo proměnné „*p1*“ (rov. (61)) zapsat přímo výraz  $\frac{1}{2}(h_s - h_d)$ , neboť takovýto způsob zápisu do bloku „*If*“ verze Matlab 7.1 nepodporuje.

### 5.3.2.2. Simulační schéma subsystému „*Hmotnostní prutok*“

Subsystém je zobrazen na Obr. 5.18. Jedná se o nejsložitější subsystém v celém simulačním schématu. neboť jsou zde dvě rozhodovací úrovně. Vnější rozhodovací úroveň je podle posunutí šoupátka, hodnota  $x_s$  („+“ nebo „-“) a vnitřní rozhodovací úroveň je podle poměru tlaků před a za šterbinou (podkritické a nadkritické proudění vzduchu). Vnitřní uspořádání subsystému „*Hmotnostní prutok*“ je na Obr. 5.24.

Do subsystémů vstupují parametry:

- $x_s$  - posunutí šoupátka;
- $p_A, p_B$  - okamžitý tlak v prostorech válce „A“, „B“;
- $A_v$  - velikost průtočné plochy ventilu;
- $T$  - teplota vzduchu ve ventilu.

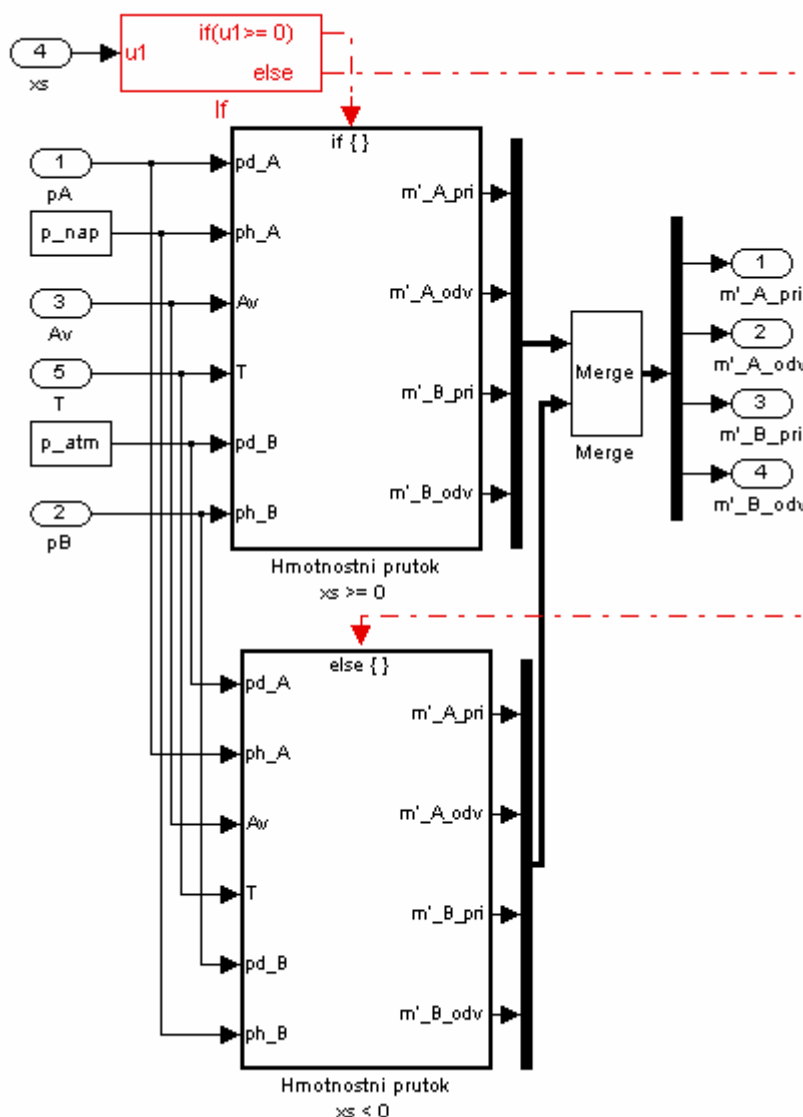
Vystupující parametry:

- $m'_A_{pri} / m'_A_{odv}$  - přiváděný / odváděný hmotnostní tok vzduchu do pracovního prostoru válce označeného „A“;
- $m'_B_{pri} / m'_B_{odv}$  - přiváděný / odváděný hmotnostní tok vzduchu do pracovního prostoru válce označeného „B“.

Kde:

- $p_{nap}$  – napájecí tlak vzduchu do pneumatického obvodu,
- $p_{atm}$  – atmosférický tlak vzduchu.





Obr. 5.24 Vnitřní uspořádání subsystému „Hmotnostní prtok“

Podle směru vychýlení šoupátka a pro správný výpočet rovnic (32) a (33), bylo nutné stanovit, do kterého z pracovních prostor válce („A“ nebo „B“) se začne přivádět tlakový vzduch a z kterého pracovního prostoru válce se bude odvádět.

Popis Obr. 5.24:

Jestliže  $u1 \geq 0$ , došlo ke kladnému vychýlení šoupátka, bude vybrán subsystém „Hmotnostní prtok  $xs \geq 0$ “, z pracovního prostoru „B“ bude vzduch vypouštěn, z toho plyne:

- Tlak v pracovním prostoru „A“ pneumatického válce je nižší, než  $p_{nap}$  (napájecí tlak), dochází k napouštění pracovního prostoru válce tlakovým vzduchem přes průtokovou plochu  $A_V$  :

$$p_A \leq p_{nap} \Rightarrow p_d = p_A; \quad p_h = p_{nap} \text{ - parametry do rov. (32) a (33)}$$

- Tlak v pracovním prostoru „B“ pneumatického válce je vyšší než  $p_{atm}$  (atmosférický tlak), dochází k úniku vzduchu do atmosféry přes průtokovou plochu  $A_V$  :

$$p_B \geq p_{atm} \Rightarrow p_d = p_{atm}; \quad p_h = p_B \text{ - parametry do rov. (32) a (33)}$$

Pokud neplatí  $u_I \geq 0$ , došlo k zápornému vychýlení šoupátka, bude vybrán subsystém „*Hmotnostní prtok  $x_s < 0$* “, z pracovního prostoru „A“ bude vzduch vypouštěn z toho plyne:

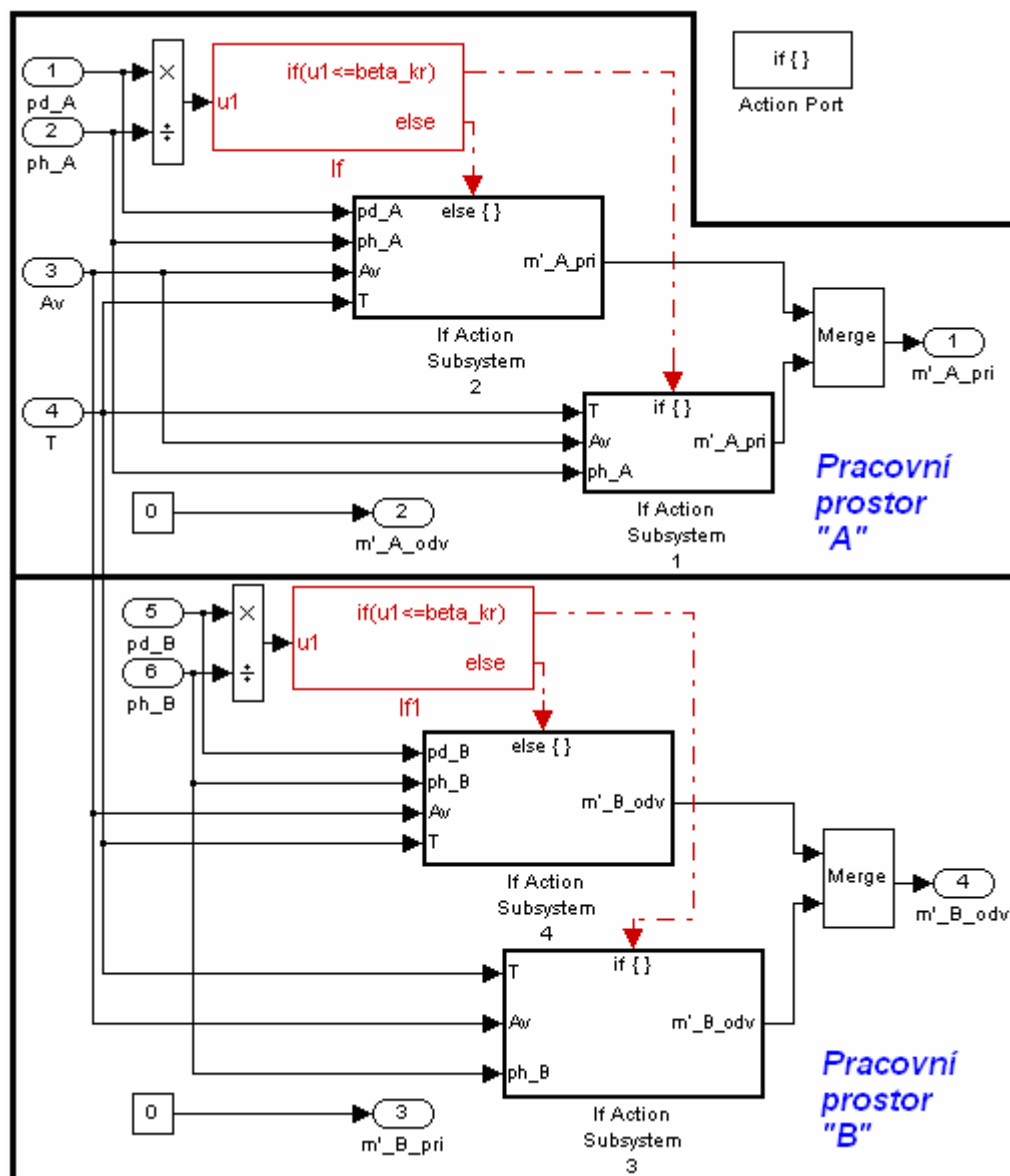
- Tlak v pracovním prostoru „A“ pneumatického válce je vyšší, než  $p_{atm}$ , dochází k vypouštění tlakového vzduchu z pracovního prostoru „A“ přes průtokovou plochu  $A_V$  :

$$p_A > p_{atm} \Rightarrow p_d = p_{atm}; \quad p_h = p_A \text{ - parametry do rov. (32) a (33)}$$

- Tlak v pracovním prostoru „B“ pneumatického válce je nižší než  $p_{nap}$ , dochází k napouštění pracovního prostoru „B“ tlakovým vzduchem přes průtokovou plochu  $A_V$ :

$$p_B < p_{nap} \Rightarrow p_d = p_B; \quad p_h = p_{nap} \text{ - parametry do rov. (32) a (33)}$$

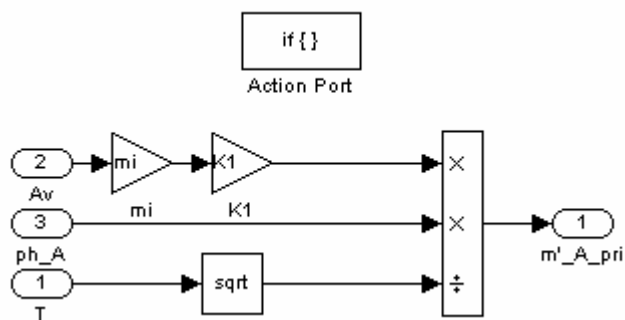
Bylo nutné rozhodnout, zda proudění vzduchu z místa s vyšším tlakem do místa s nižším tlakem, je nadkritické nebo podkritické (Obr. 4.6). Uvnitř subsystémů „*Hmotnostní prtok  $x_s \geq 0$* “ a „*Hmotnostní prtok  $x_s < 0$* “ jsou namodelovány rovnice (32) a (33), vnitřní zapojení subsystému „*Hmotnostní prtok  $x_s \geq 0$* “ je na Obr. 5.25.


 Obr. 5.25: Vnitřní zapojení subsystému „Hmotnostní prtok  $x_s=0$ “

Simulační schéma na Obr. 5.25 je možné rozdělit na 2 části. Schéma pro pracovní prostor pneumatického válce označený „A“ a pracovní prostor „B“. Podle rovnice (29) bylo nutné spočítat  $\beta_{krit} \equiv \beta_{kr}$  a testovat poměr  $\frac{p_d}{p_h}$ , který je rozhoduje, jestli je proudění vzduchu podkritické, nebo nadkritické a správně spočítat hmotnostní průtok vzduchu otvorem ventilu.

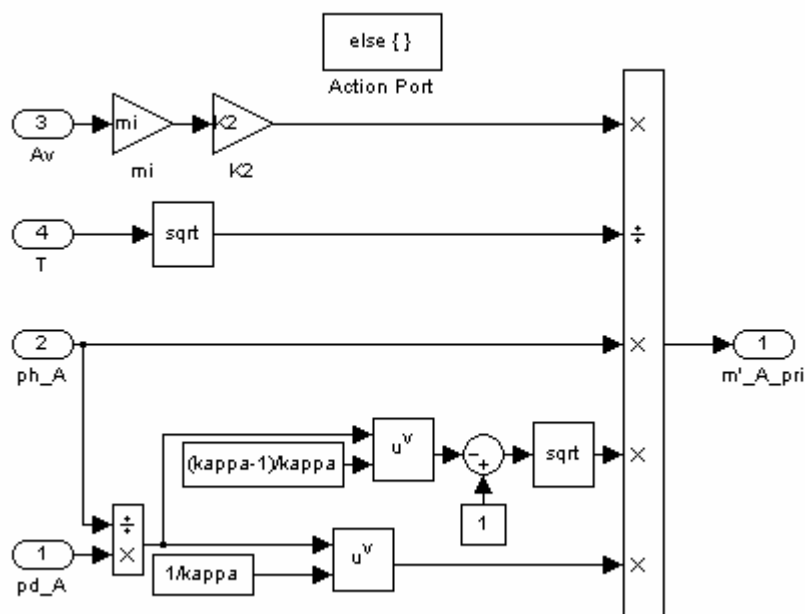
Jestliže  $\beta_{kr} \geq \frac{p_d}{p_h}$ , proudění vzduchu je nadkritické, vybrán subsystém „If

Action Subsystem 1“ v němž je namodelovaná rov. (32), viz Obr. 5.26.



Obr. 5.26: Vnitřní zapojení subsystému „If Action Subsystem 1“, z Obr. 5.25, odpovídající rovnici (32)

Pokud neplatí podmínka  $\beta_{kr} \geq \frac{p_d}{p_h}$ , pak proudění vzduchu je podkritické, je vybrán „If Action Subsystem 1“, kde platí rov. (33), její namodelování je na Obr. 5.27.



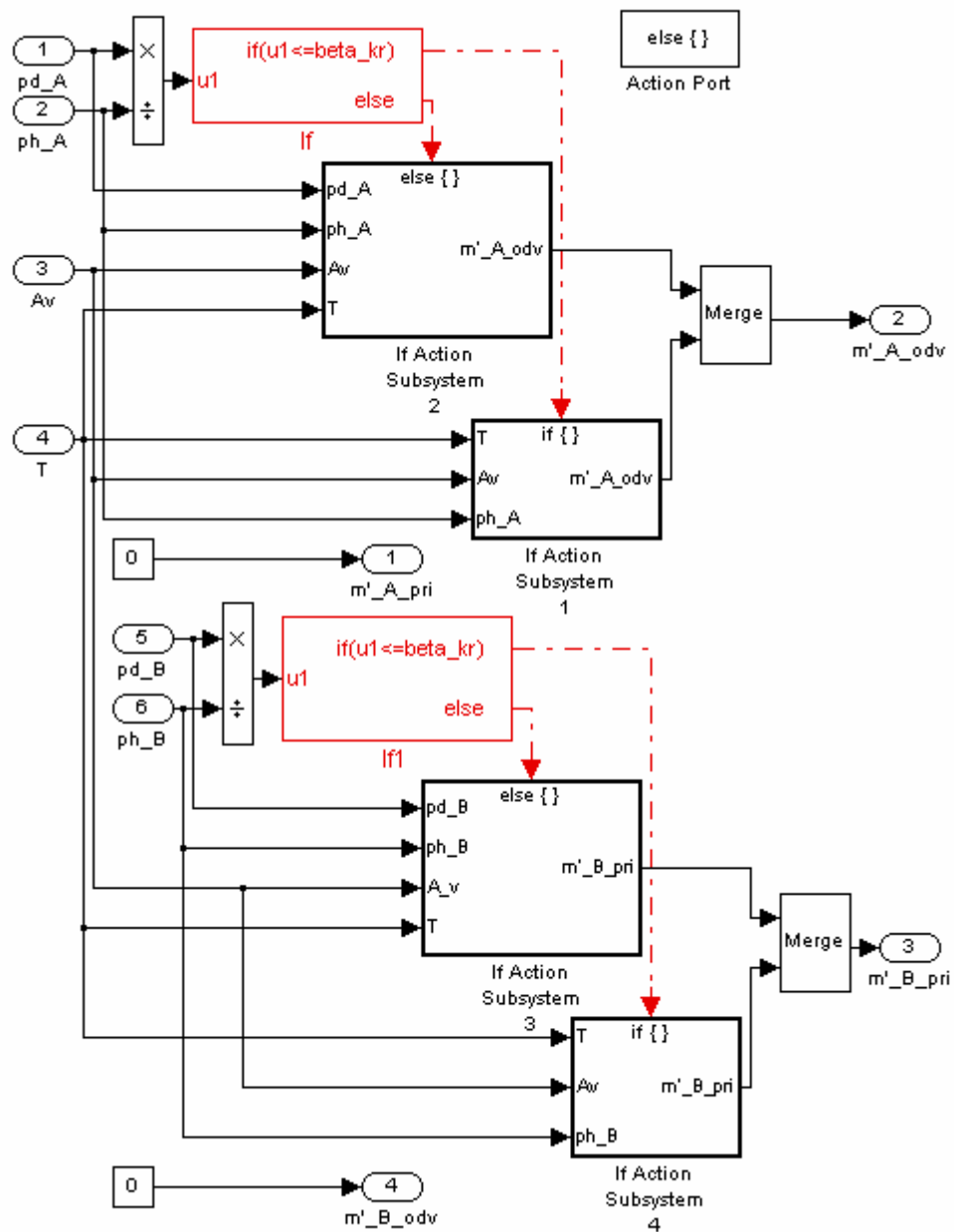
Obr. 5.27: Vnitřní zapojení subsystému „If Action Subsystem 2“, z Obr. 5.25, odpovídající rovnici (33)

Vnitřní zapojení pro subsystémy „If Action Subsystem 3“ a „If Action Subsystem 4“ je stejné jako pro „If Action Subsystem 1“ a „If Action Subsystem 3“, pouze subsystémy If Action Subsystem 3“ a „If Action Subsystem 4“ jsou řízeny blokem „If1“, je vyměněn tlak  $p_A$  za  $p_B$  a  $m'_A\_pri$  za  $m'_B\_odv$ .

Pozn.:

V Obr. 5.25 je na výstupy  $m'_A_{odv}$  a  $m'_B_{pri}$  přivedena „0“. To je z důvodu, že pokud v tomto případě do pracovního prostoru „A“ přivádíme stlačený vzduch, je předpoklad, že z pracovního prostoru „A“ neuniká  $m'_A_{odv} = 0$  (např. netěsností). Stejný předpoklad je i u pracovního prostoru „B“, že pokud vzduch z pracovního prostoru válce vypouštíme do atmosféry (v této konfiguraci), současně nepřivádíme dovnitř žádný tlakový vzduch  $m'_B_{pri} = 0$ .

Pro úplnost je uvedeno vnitřní zapojení subsystému „*Hmotnostní prtok  $xs < 0$* “ z Obr. 5.24. V tomto případě je pracovní prostor „A“ pneumatického válce jako výpustní (vzduch je vypouštěn přes tlumič do atmosféry) a do pracovního prostoru „B“ se přivádí stačený vzduch. Úvahy o průtoku vzduchu se provádějí stejně, jako při popisu subsystému „*Hmotnostní prtok  $xs \geq 0$* “, jen stačí vyměnit „A“ za „B“ a dát pozor na připojení  $p_{nap}$ ,  $p_{atm}$ ,  $p_A$  a  $p_B$  v subsystému „*Hmotnostní prtok  $xs < 0$* “ (Obr. 5.28) oproti subsystému „*Hmotnostní prtok  $xs \geq 0$* “ (Obr. 5.25).

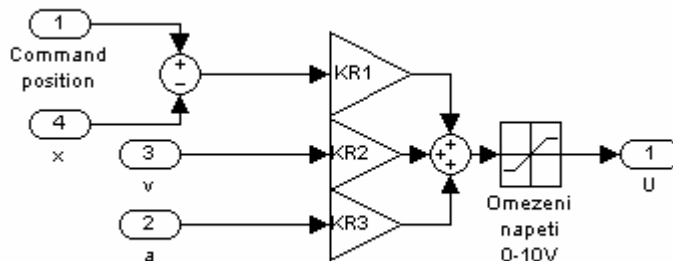


Obr. 5.28: Vnitřní zapojení subsystému „Hmotnostní průtok  $x_s < 0$ “

Souhrn parametrů v simulačním schématu pro pneumatický ventil MPYE a lineární jednotku DGPL je uveden v kapitole 5.4.

### 5.3.3. Simulační schéma regulátoru koncových poloh SPC11

Podle lit. [15] je zjednodušené vnitřní zapojení regulátoru SPC11 na Obr. 5.29. Než bylo možné porovnávat výsledky simulací a měření, musejí být známé konstanty  $KR1$ ,  $KR2$ ,  $KR3$ . V katalogu a ani dotazem u výrobce (fy. Festo), nebylo možné zjistit velikosti konstant, které by odpovídaly simulačnímu schématu. Výrobce udává Tab. 5.1, ve které jsou parametry zadávané do SPC11, ale nevyhovují jako parametry do simulačního schématu. Z těchto důvodů bylo nutné zjistit nastavení konstant experimentálně.



Obr. 5.29: Vnitřní zapojení subsystému SPC11 z Obr. 5.13

#### 5.3.3.1. Nalezení konstant regulátoru SPC11

Postup nalezení konstant:

1. Naměření odezvy polohy pístu (Obr. 5.30) na skokovou změnu žádané hodnoty polohy z Pos\_C do Pos\_D (Obr. 5.10) reálného pneumatického systému (Obr. 5.1).
2. Nasimulování odezvy polohy pístu na stejný skok žádané hodnoty polohy, jako v bodě 1. se zvolenými konstantami regulátoru (výběr z určeného rozsahu hodnot).
3. Porovnání naměřené a nasimulované odezvy
4. Pokud charakteristiky souhlasí, konstanty jsou správně zvoleny, jinak se postup opakuje od bodu 2. s jinými konstantami regulátoru.

Nejdříve byla nalezena konstanta  $KR1$ . Její nalezení bylo poměrně jednoduché. Pneumatickému systému byl zadán skok žádané polohy a naměřena byla změna výstupního napětí regulátoru, které vstupuje do ventilu MPYE. Skoková změna polohy byla tak malá, aby na výstupu regulátoru v okamžiku skokové změny žádané hodnoty polohy, nebyla dosažena mezní hodnota napětí (0V nebo 10V). Jednoduchým výpočtem z Obr. 5.29 zjistíme  $KR1$ :

V okamžiku skokové změny žádané polohy je hodnota rychlosti i zrychlení nulová ( $\dot{x} \equiv v = 0, \ddot{x} \equiv a = 0$ ), tím dojde k vyřazení konstant  $KR2$  a  $KR3$ , pak platí rovnice:

$$\Delta U = KR1 \cdot (Command\ position - x) \Rightarrow$$

$$KR1 = \frac{\Delta U}{(Command\ position - x)} \quad (63)$$

- platí pouze v okamžiku změny žádané polohy (z 0,365 na 0,273) a píst musí být v klidu ( $\dot{x} \equiv v = 0, \ddot{x} \equiv a = 0$ )

- *Command position* - Žádaná hodnota polohy
- $x[m]$  - skutečná poloha pístu
- $\Delta U[V]$  - změna napětí na výstupu regulátoru

Po dosazení do rov. (63)

$$KR1 = \frac{-2,3}{0,273 - 0,365} = 25 \left[ \frac{V}{m} \right] \quad (64)$$

Hodnoty žádané a skutečné polohy byly použity při simulaci na Obr. 5.30. Změna napětí  $\Delta U = -2,3[V]$  byla změřena osciloskopem při startu.

Nyní již zbývá určit konstanty  $KR2$  a  $KR3$ . Po provedení většího množství simulací, měření a měněním velikostí konstant  $KR2$  a  $KR3$ , byly nakonec zjištěny tyto parametry regulátoru SPC11:

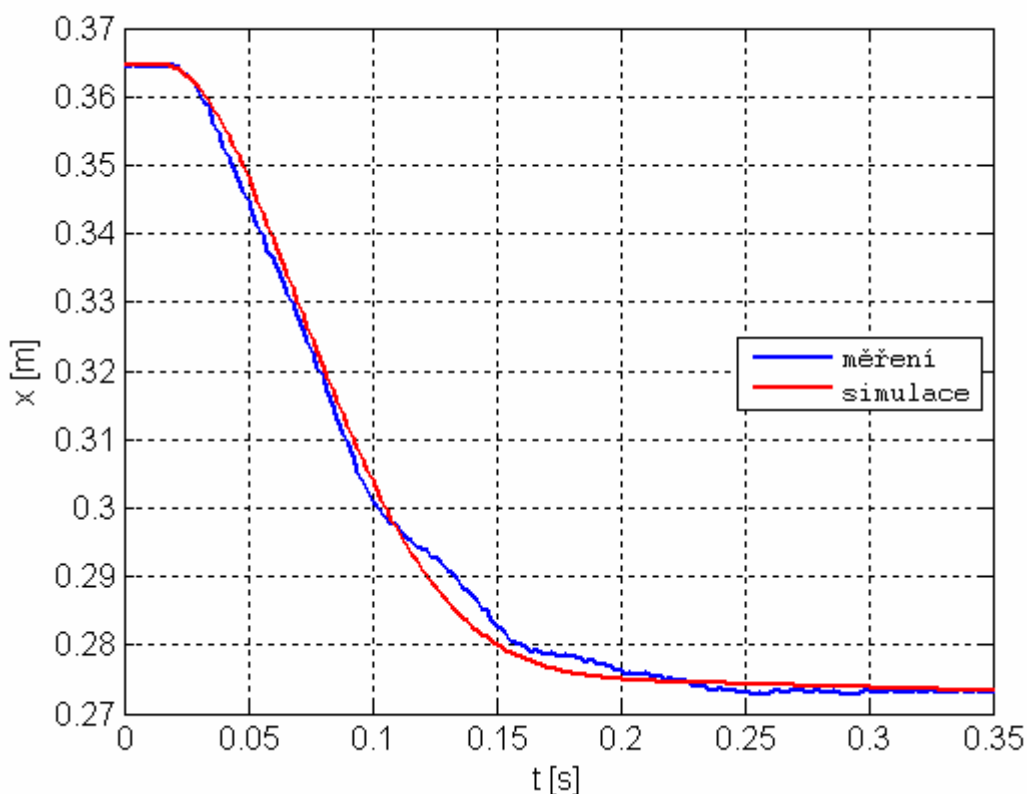


$KR1$	$KR2$	$KR3$
$\left[ \frac{V}{m} \right]$	$\left[ \frac{V \cdot s}{m} \right]$	$\left[ \frac{V \cdot s^2}{m} \right]$
<b>25</b>	<b>-0,7</b>	<b>-0,01</b>

Tab. 5.2: Parametry regulátoru SPC11 v simulačním schématu odpovídající konstantám z

Tab. 5.1, strana 54 ( 0-3 kg  $\Rightarrow$  1. řádek)

Porovnání simulací a měření pro stanovení konstant je na Obr. 5.30. Vycházelo se ze zapojení na Obr. 5.1 (měření) a z Obr. 5.13 (simulace). Při simulaci a měření na Obr. 5.30 byl napájecí tlak (absolutní) pneumatického systému  $p_{nap} = 0,5 [MPa]$ ,  $m_z = 0$ ,  $F_z = 0$ ,  $T \approx 20 + 273,15 [K]$ . Přehled ostatních parametrů simulačního modelu je v kapitole 5.4. U Obr. 5.30 byl skok polohy z 0,365 [m] („Pos\_C“,  $x_0$  v simulačním schématu) do 0,273 [m] („Pos\_D“, „Command position“ v simulačním schématu). Měření bylo provedeno dle obr. 5.1.



Obr. 5.30: Porovnání naměřené a simulované odezvy soustavy na skok polohy

#### **5.4. Souhrn konstant použitých v mat. modelu pneumatického systému**

##### **Neměnné parametry:**

##### **Lineární pneumatická jednotka DGPL:**

$D=32\text{e-}3$ ;  $S=\pi*D^2/4$ ;  $m_p=0.6$ ;  $L=500\text{e-}3$ ;  $V_0=6.4\text{e-}5$ ;

##### **Tření:**

$F_{TS}=51$ ;  $F_C=35$ ;  $G=56$ ;

##### **Vlastnosti plynu:**

$r=287$ ;  $\kappa=1.4$ ;  $T=20+273.15$ ;

##### **Konstanty do tlakových rovnic:**

$\alpha_{pri}=1.4$ ;  $\alpha_{odv}=1$ ;  $\alpha=1.2$ ;

##### **Pneumatický ventil MPYE:**

$m_i=1$ ;  $\beta_{kr}=(2/(\kappa+1))^{(\kappa/(\kappa-1))}$ ;  $K_2=\sqrt{2*\kappa/r/(\kappa-1)}$ ;

$K_1=\sqrt{\kappa/r*(2/(\kappa+1))^{((\kappa+1)/(\kappa-1))}}$ ;  $D_v=11\text{e-}3$ ;  $h_s=3\text{e-}3$ ;  
 $h_d=2,4\text{e-}3$ ;

$p_1=1/2*(h_s-D_v)$ ;  $p_2=1/2*(h_s+D_v)$ ;  $T_{sv}=1/(2*\pi*100)$ ;  $\kappa_{si}=0.6$ ;

##### **Proměnné parametry:**

**Tlak vzduchu:**  $p_{nap}$ ; ( $p_{atm}=0.1\text{e}6$  = okolní tlak vzduchu);

**Hmotnost zátěže:**  $m_z$

**Externí zátěžná síla:**  $F_z$

**Parametry Regulátor SPC11:**  $KR_1$ ;  $KR_2$ ;  $KR_3$ ;

Simulační	Matematické
Schéma	Rovnice
Kappa	$\kappa$
Mi	$\mu$
Alfa	$\alpha$
alfa_pri	$\alpha_{pri}$
Alfa_odv	$\alpha_{odv}$
Sqrt	$\sqrt{\phantom{x}}$
$m'_{A\_pri}$	$\dot{m}_{A_{pri}}$
$m'_{A\_odv}$	$\dot{m}_{A_{odv}}$
$m'_{B\_pri}$	$\dot{m}_{B_{pri}}$
$m'_{B\_odv}$	$\dot{m}_{B_{odv}}$
$pA$	$p_A$
$pB$	$p_B$
Tsv	$T_{sv}$
ksi	$\xi_{sv}$

Tab. 5.3: Některé použité proměnné v simulačním schématu a jejich ekvivalenty v matematických rovnicích

### 5.5. Simulace a měření na pneumatickém polohovém servosystému

Všechny následující měření a simulace, byly prováděny dle obr. 5.1 za těchto provozních podmínek:

- $p_{nap} = 0,7 [MPa]$  (absolutní tlak);
- $p_{atm} = 0,1 [MPa]$  (atmosférický tlak);
- $T \approx 20 + 273,15 [K]$  (teplota vzduchu).

Naměřená zdrojová data jsou k dispozici na CD, které je přiloženo k disertační práci. Jsou tam umístěny soubory se zdrojovými daty zde zobrazovaných grafů, tak i zdrojová data dalších grafů a závislostí, které nejsou z důvodu přehlednosti práce uváděny.

### 5.5.1. Přesnost polohování

V katalogu fy. Festo se udává, že přesnost najíždění do mezipoloh jednotky DGPL s použitím regulátoru SPC 11 je  $\pm 0,25\%$  z celkové délky zdvihu ( $L$ ), minimálně však  $\pm 2$  mm. Tato informace byla ověřena měřením.

Výpočet přesnosti polohování:

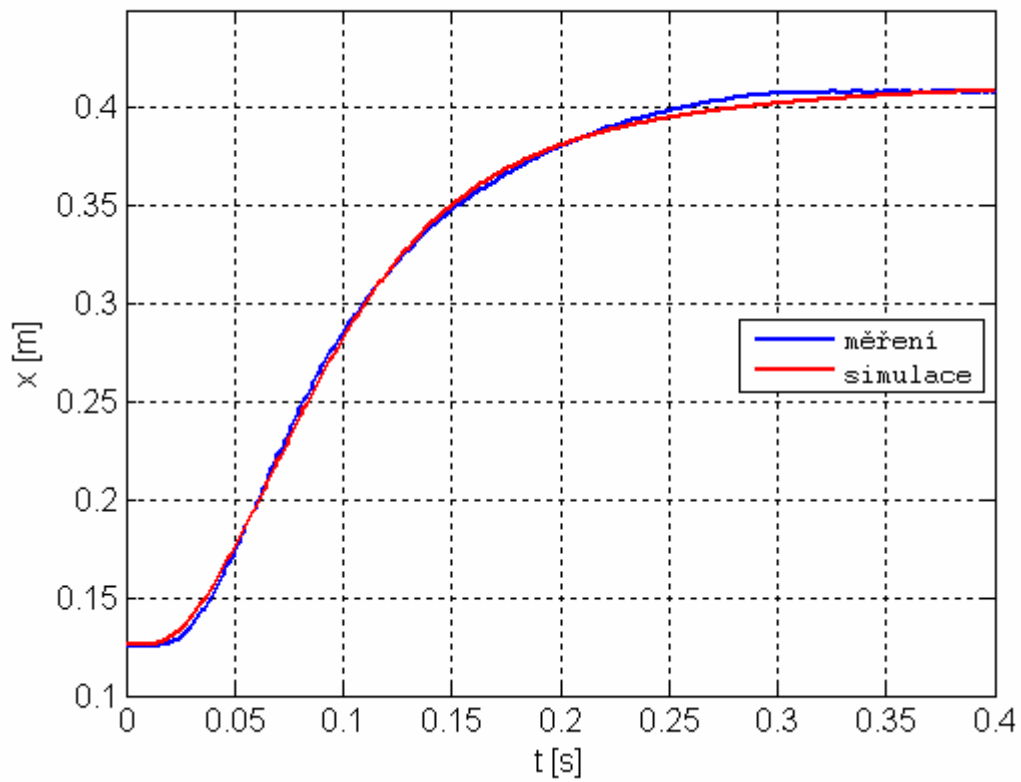
$$L = 500[mm] \Rightarrow \pm 0,0025 \cdot 500 = \pm 1,25[mm]$$

Podle výpočtu by měla být přesnost  $\pm 1,25[mm]$ , avšak v katalogu je dále uvedeno, že je to minimálně  $\pm 2[mm]$ .

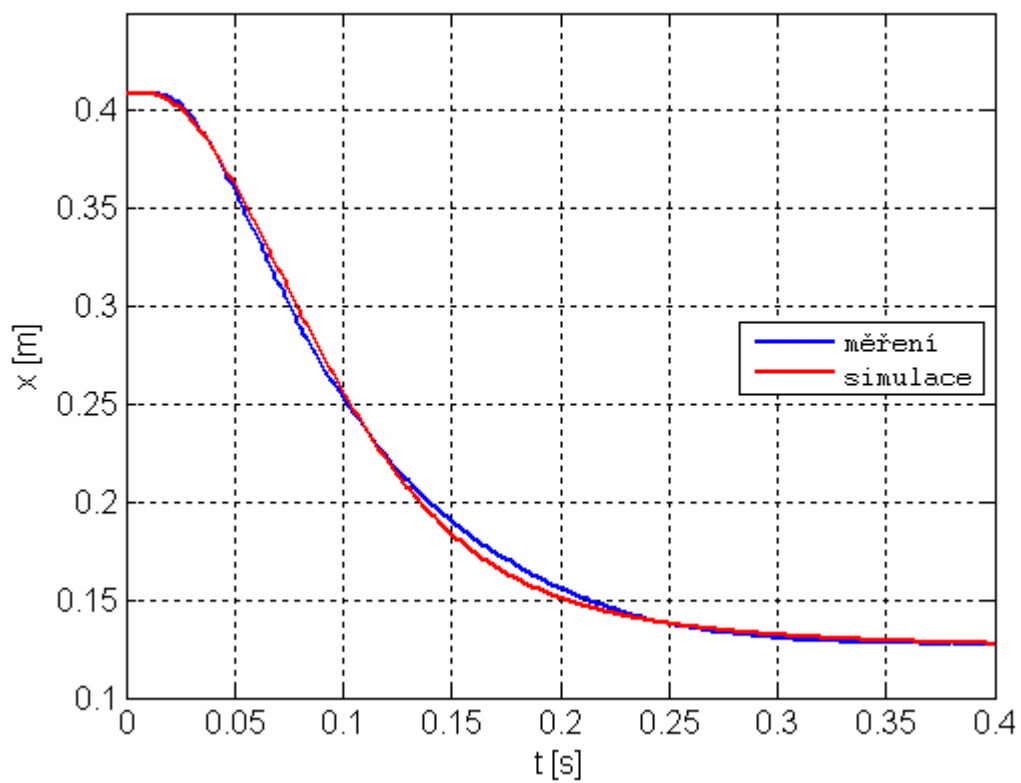
Parametry měření a simulace jsou stejné, jako v kapitole 5.4, doplněno o  $m_z = 0$ ,  $F_z = 0$  a SPC11 nastaven podle Tab. 5.1.

Na Obr. 5.31 je zobrazeno najíždění pístu do žádané hodnoty polohy („*Command position*“ =  $0,407[m]$ ) a na Obr. 5.32 je najížděno pístu do žádané polohy („*Command position*“ =  $0,126[m]$ ).

Po zastavení pístu a zvětšení ustálené hodnoty skutečné polohy spočítána přesnost polohování. U Obr. 5.31 je rozdíl mezi žádanou a skutečnou polohou v ustáleném stavu  $+1[mm]$  (pro simulaci i měření) a u Obr. 5.32 je to  $-1,5[mm]$ .



Obr. 5.31: Ukázka přesnosti polohování, najíždění pístu z 0,126[m] do 0,407[m]



Obr. 5.32: Ukázka přesnosti polohování, najíždění pístu z 0,407[m] do 0,126[m]

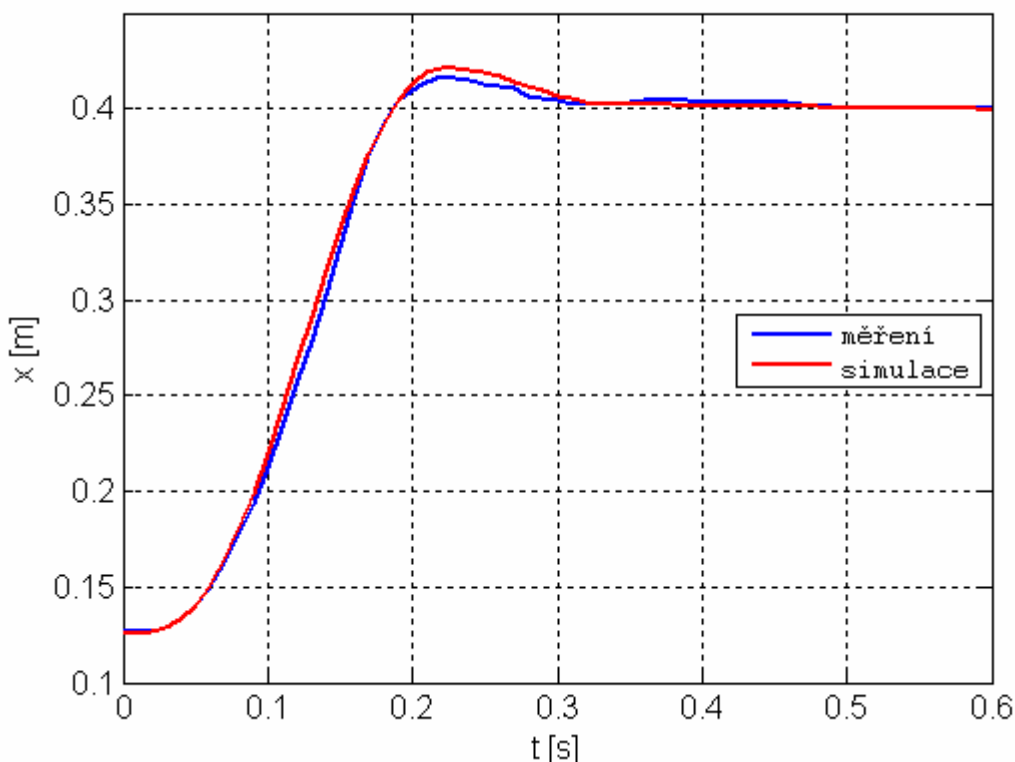
Naměřené i simulované odchylky polohování (vypočtené výše) jsou v tolerančním pásmu uvedeném v katalogu fy. Festo.

## 5.5.2. Vliv změny externích parametrů soustavy

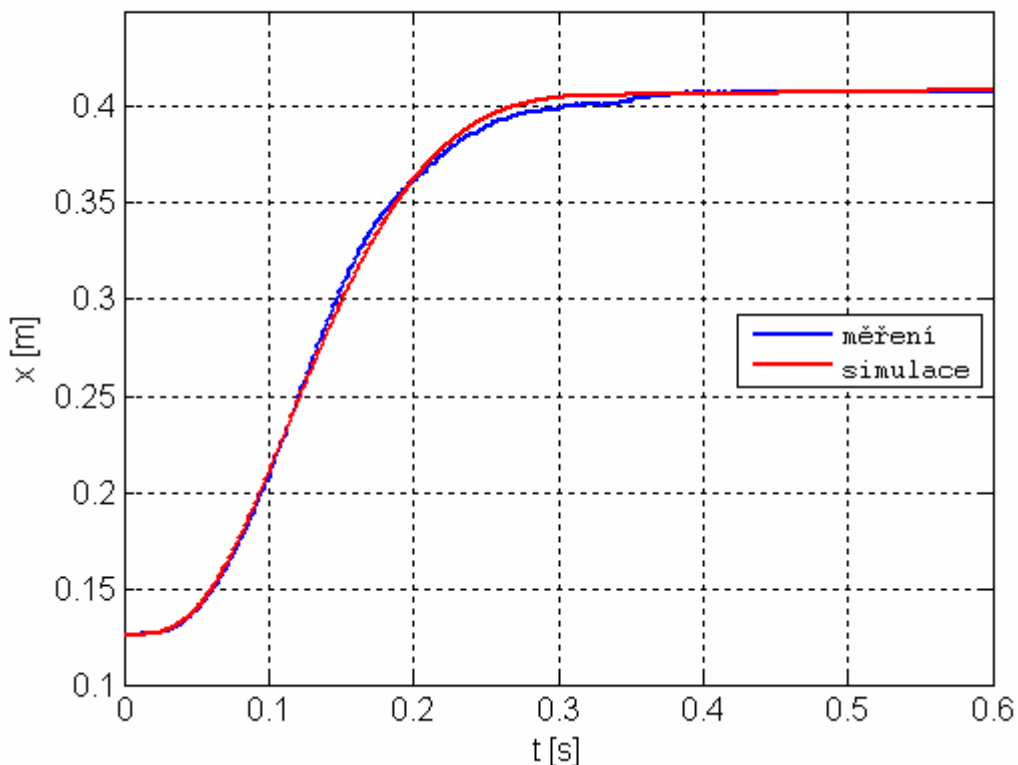
### 5.5.2.1. Změna zátěžné hmotnosti $m_Z$

Změnou zatížení  $m_Z$  dochází k celkové změně pohybujících se hmot. Z tohoto důvodu již není odezva soustavy na skok polohy aperiodický průběh (viz. např. Obr. 5.31), ale může docházet k překmitávání (Obr. 5.33). V určitých průmyslových uplatněních je nežádoucí, aby docházelo k překmitům, proto je nutné změnit nastavení konstant ( $KR1$ ,  $KR2$ ,  $KR3$ ) regulátoru SPC11 podle Tab. 5.1, tak jak udává výrobce.

Na Obr. 5.33 je zobrazena odezva soustavy, kdy na jezdce lineární jednotky DGPL byla přidána zátěž  $m_Z \approx 5[kg]$  a regulátor zůstal nastaven na původních hodnotách, skok polohy byl proveden z 0,126 [m] do 0,4 [m].



Obr. 5.33: Odezva soustavy na skok polohy,  $m_Z \approx 5[kg]$



Obr. 5.34: Odezva soustavy na skok polohy,  $m_z \approx 5 [kg]$ , změna parametrů regulátoru

Na Obr. 5.34 je zobrazena odezva soustavy na žádaný skok polohy 0,401 [m] se změněnými parametry regulátoru. Z Tab. 5.1 byly nastaveny parametry regulátoru SPC11 pro hmotnost 3-6 kg (2. řádek). Lze si povšimnout, že již nedochází k překmitům a odezva soustavy je opět aperiodického průběhu, stejně jako na obr. Obr. 5.31, kde je zátěž  $m_z = 0 [kg]$ .

Nastavení SPC11 podle Tab. 5.1 pro 3-6 kg (2. řádek) odpovídá následující nastavení konstant ( $KR1$ ,  $KR2$ ,  $KR3$ ) v simulačním schématu:

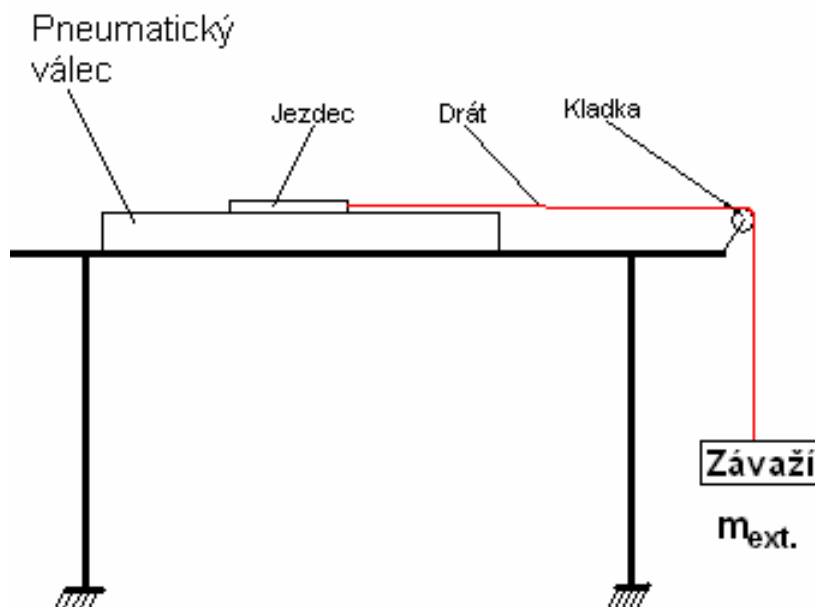
$KR1$	$KR2$	$KR3$
$\left[ \frac{V}{m} \right]$	$\left[ \frac{V \cdot s}{m} \right]$	$\left[ \frac{V \cdot s^2}{m} \right]$
<b>40</b>	<b>-3</b>	<b>-0,1</b>

Tab. 5.4: Parametry regulátoru SPC11 v simulačním schématu odpovídající konstantám z Tab. 5.1.( 3-6 kg  $\Rightarrow$  2. řádek)

Konstanty v Tab. 5.4 byly určeny stejným postupem jako pro  $m_z = 0 [kg]$  v kapitole 5.3.3.1.

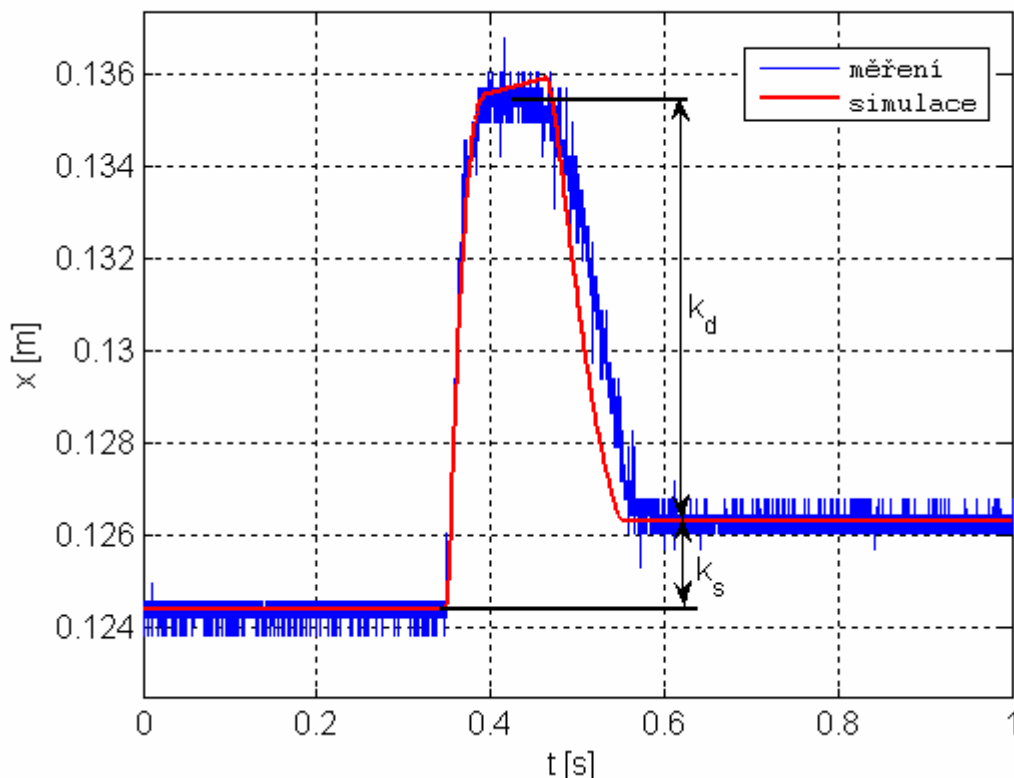
### 5.5.2.2. Změna velikosti externí zátěžné síly $F_z$

V další části disertační práce byl testován vliv skokové změny zátěžné síly. Provedení je patrné ze schématického Obr. 5.35. K jezdci je připevněno závaží pružinovým drátem přes kladku. Jezdec je v klidové poloze ( $\dot{x} \equiv v = 0, \ddot{x} \equiv a = 0$ ). Skokové změny síly bylo docíleno tak, že v určitém momentě došlo k přestřižení drátu a tím se uvolnil jezdec. Došlo k vychýlení pístu zobrazeném na Obr. 5.36.



Obr. 5.35: Schématické zobrazení zapojení při vytváření skoku zátěžné síly





Obr. 5.36: Odezva soustavy na skok externí síly  $F_Z$

Parametry měření a simulace:

$m_{ext.} = 18,1 [kg] \Rightarrow F_Z \approx 176 [N]$  - skok síly byl z 176[N] na 0[N] v čase přibližně 0,35 [s].

Regulátor SPC11 nastavený pro měření dle Tab. 5.1 (1. řádek) a pro simulaci ekvivalentní hodnoty z Tab. 5.2.

Ostatní parametry konstant nastaveny stejné, jako v kapitolách 5.4 a 5.5.

### Popis experimentu

S pístem pneumatického válce se najelo na hodnotu polohy 0,1265 [m]. Následně byl jezdec zatížen silou  $m_{ext.} = 18,1 [kg] \Rightarrow F_Z \approx 176 [N]$  dle Obr. 5.35, tím došlo k vychýlení polohy pístu na hodnotu 0,1245 [m], což je patrné na Obr. 5.36. Po přestřižení drátu a uvolnění zatěžující síly se píst s jezdce vrátil zpět do původní polohy přibližně 0,1265 [m]. Obr. 5.37

### Tuhost pneumatického systému

- $k_s$  - statická tuhost – odezva soustavy na konstantní zatížení ( $F_z = konst.$ )
- $k_d$  - rázová dynamická tuhost – odezva soustavy na skokovou změnu působícího zatížení

$$k_s = \left| \frac{F_z}{\Delta x_s} \right| = \left| \frac{176}{0,1245 - 0,1265} \right| \approx 8,8 \cdot 10^4 \left[ \frac{N}{m} \right] \quad (65)$$

- $\Delta x_s$  - změna polohy pneumatického systému vlivem zatížení po odeznění přechodového děje.

$$k_d = \left| \frac{\Delta F_z}{\Delta x_d} \right| = \left| \frac{176 - 0}{0,1355 - 0,1265} \right| \approx 1,95 \cdot 10^4 \left[ \frac{N}{m} \right] \quad (66)$$

- $\Delta x_d$  - maximální výchylka pneumatického systému při rázovém skoku zatížení  $F_z$  z  $176[N] \rightarrow 0[N]$

## 6. Prezentace a sdílení výsledků

Pro úspěšné splnění cílů práce bylo nutno odpovídajícím způsobem prezentovat a sdílet výsledky práce, zejména pak matematický model. V rámci disertace proto byla vytvořena webová aplikace, umožňující provádět vzdáleně simulace. Uživatel má možnost nastavit požadované parametry modelu a na základě těchto parametrů si nechat zobrazit výsledky simulací. K správné funkci uživatel nepotřebuje mít na svém počítači nainstalován Matlab, neboť celá aplikace je koncipována jako takzvaný „tenký klient“ a k jejímu používání tedy stačí mít nainstalován webový prohlížeč (Příloha č.9).

Pro zveřejnění výsledků zcela nezávisle na klientovi byla vytvořena webová služba (web service). Pomocí této služby může uživatel získat do libovolné aplikace výsledky simulace podle jím zadaných parametrů a dále je zpracovat libovolným způsobem (Příloha č.8).

Dále byl do webové aplikace přidán takzvaný SVG modul (Příloha č.10), který zobrazuje celý model soustavy včetně jeho submodelů na www. Celým modelem lze stejně jako v prostředí Matlabu procházet, zobrazovat submodely jednotlivých částí a jejich nastavení.

Aplikace byla nasazena na serveru Katedry aplikované kybernetiky, kde je k dispozici pro volné používání. Tato část disertační práce se zabývá dílčími funkcemi aplikace a vysvětlením jejich jednotlivých částí.

### 6.1. Webová aplikace

#### 6.1.1. Volba technologie

Pro volbu vhodné technologie bylo nutné zjistit všechny systémové požadavky, které budou jednotlivé části aplikace mít. Pro klasickou webovou aplikaci bychom nebyli v podstatě ničím omezeni. Ale vytvářená aplikace bude muset mít možnost komunikovat s Matlabem. Toto omezení v podstatě vyloučilo použití skriptovacích jazyků jako je například PHP. Bylo nutno hledat technologii, která komunikaci si Matlabem umožní.

Nejprve došlo k testování modulů Matlabu. Matlab totiž již sám o sobě umožňuje kód z m-file zkompileovat a následně používat ve vlastních aplikacích. Tento způsob se zdál na první pohled ideální, avšak jeho použití nebylo možné. Nepodporuje

totiž všechny funkce Matlabu. Při testování bylo zjištěno, že po úspěšné kompilaci dochází při běhu programu k chybám, které způsobují nedefinované funkce Matlabu.

Následně došlo k testům knihovny JMatLink, která dovoluje používat Matlab z jazyku Java, transportovat z Javy do Matlabu a opačným směrem proměnné a jejich hodnoty. Obdobné knihovny existují také pro jazyk C.

Pro webové aplikace byla ovšem jako ideální shledána Java<sup>3</sup>, proto bylo rozhodnuto o jejím použití k tomuto účelu. Jako server byl vybrán Tomcat verze 5, distribuovaný zdarma v rámci Apache Software Licence, která je kompatibilní s GPL. Výběr jazyka Java navíc znamená nezávislost na operačním systému, která v případě například jazyka .NET zaručena není, případně by nasazení aplikace na jiný operační systém znamenalo spoustu zásahů do ní.

### **6.1.2. Architektura aplikace**

Celá aplikace je vytvořena s využitím architektury MVC (Model-view-controller). Je také někdy označována jako Model 2. Rozděluje datový model aplikace, uživatelské rozhraní a řídicí logiku do tří nezávislých částí tak, že modifikace některé z nich nemá vliv na ostatní.

#### **6.1.2.1. Princip MVC**

Obecně řečeno, vytváření aplikací s využitím architektury MVC vyžaduje vytvoření tří částí a to:

- Model (model): specifická reprezentace informací s nimiž aplikace pracuje;
- View (pohled): převádí data reprezentovaná modelem do podoby vhodné k interaktivní prezentaci uživateli;
- Controller (řadič): reaguje na události (typicky pocházející od uživatele) a zajišťuje změny v modelu nebo v pohledu.

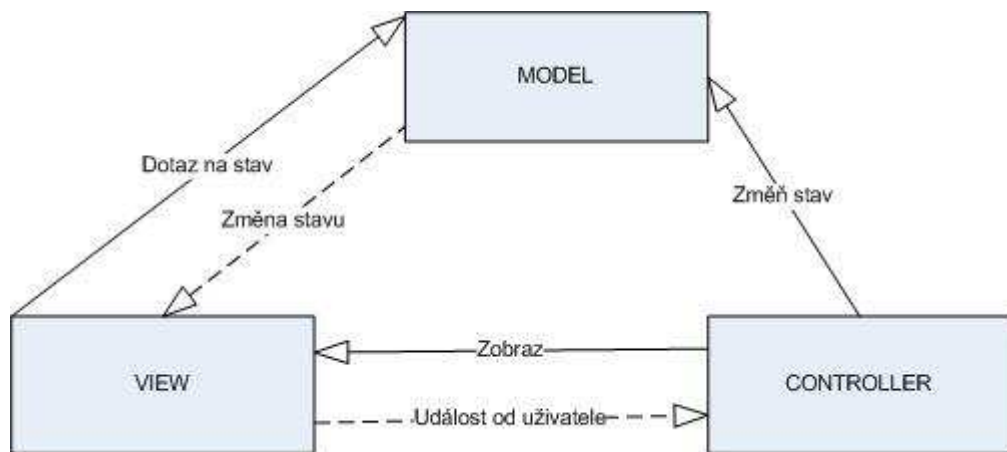
Ačkoliv může být koncept MVC realizován různým způsobem, obecně platí tento princip:

---

<sup>3</sup> K volbě jazyka Java mě vedla i skutečnost, že jsem během posledních let získal celou řadu zkušeností s jeho používáním a v roce 2006 jsem získal certifikaci „Java SUN Certified Programmer for Java 2 Platform 1.4“

1. Uživatel provede nějakou akci v uživatelském rozhraní (např. stiskne tlačítko).
2. Řadič obdrží oznámení o této akci z objektu uživatelského rozhraní.
3. Řadič přistoupí k modelu a v případě potřeby ho zaktualizuje na základě provedené uživatelské akce (např. zaktualizuje nákupní košík uživatele).
4. Model je pouze jiný název pro doménovou vrstvu. Doménová logika zpracuje změněná data (např. přepočítá celkovou cenu, daně a expediční poplatky pro položky v košíku). Některé aplikace užívají mechanismus pro perzistentní uložení dat (např. databázi). To je však otázka vztahu mezi doménovou a datovou vrstvou, která není architekturou MVC pokryta.
5. Komponenta pohled použije zaktualizovaný model pro zobrazení zaktualizovaných dat uživateli (např. vypíše obsah košíku). Komponenta pohled získává data přímo z modelu, zatímco model nepotřebuje žádné informace o komponentě View (je na ní nezávislý). Je možné použít návrhový vzor „Pozorovatel“, umožňující modelu informovat jakoukoliv komponentu o případných změnách dat. V tom případě se komponenta view zaregistruje u modelu jako příjemce těchto informací. Je důležité podotknout, že řadič nepředává doménové objekty (model) komponentě pohledu, ale může jí poslat příkaz, aby svůj obsah podle modelu zaktualizovala.
6. Uživatelské rozhraní čeká na další akci, která celý cyklus zahájí znovu.

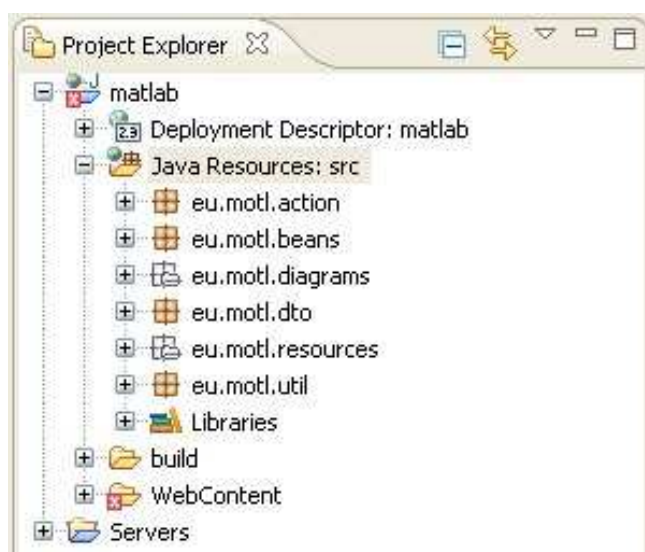
Celá architektura je patrná z obrázku Obr. 6.1.



Obr. 6.1: architektu MVC

### 6.1.2.2. Diagram tříd

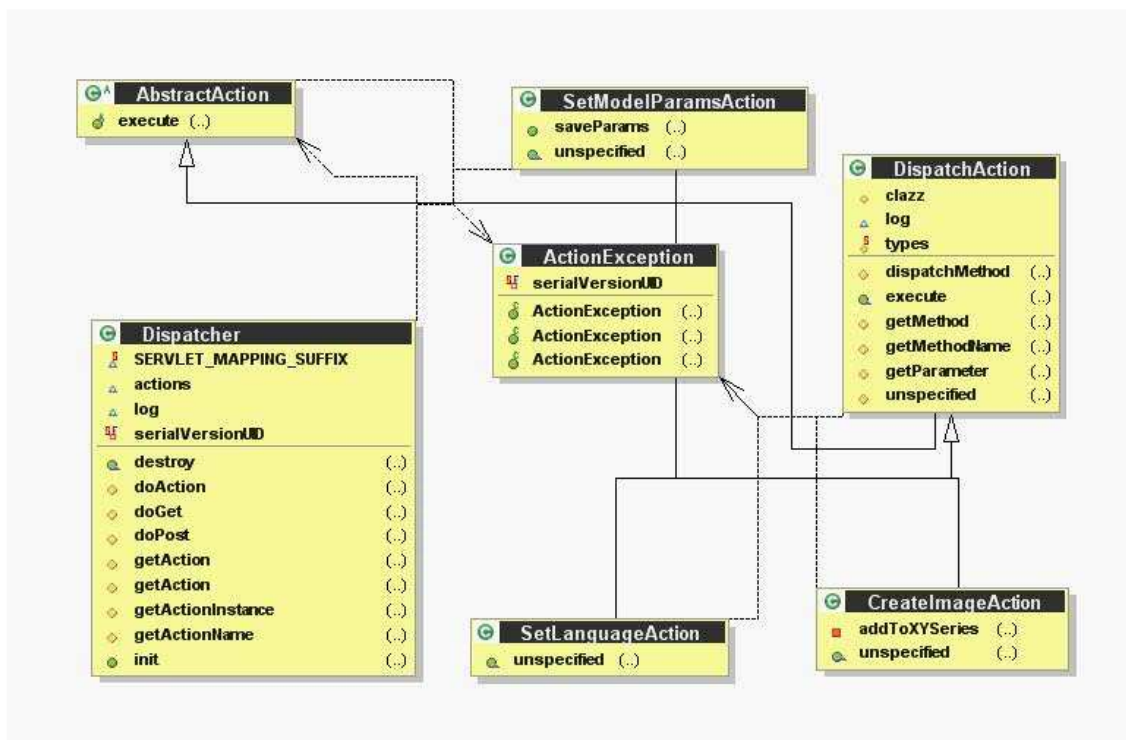
V této části jsou popsány jednotlivé balíky (package) aplikace. Ta se skládá ze čtyř hlavních balíčků a to: *action*, *beans*, *dto* a *util*. Dále je zde balíček *resources* a *diagrams*. Celá situace je vidět na obrázku Obr. 6.2.



Obr. 6.2: Balíčky aplikace.

V balíčku *actions* jsou třídy, které se v podstatě starají o propojení prezentační a datové vrstvy. V podstatě lze říci, že pokud uživatel na stránce zadá, či změní některé údaje, či chce nechat zobrazit nějakou stránku, dojde vždy k volání některé metody z těchto tříd. Volaná metoda (akce) třídy zpracuje data přichozí od uživatele a postará se u zavolání metody z některé třídy, vykonávající logiku aplikace. Výsledek tohoto

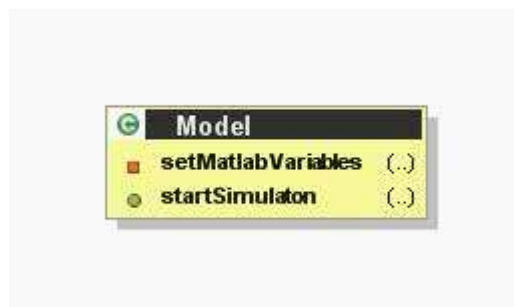
volání opět akce zpracuje a postará se vhodným způsobem o zobrazení výsledku. Hierarchie tříd v tomto balíku je vidět na obrázku Obr. 6.3.



Obr. 6.3: Hierarchie tříd v balíku actions.

Z diagramu je patrné, že jsou použity takzvané „Dispatch actions“, mající zde obdobný princip jako například ve frameworku Jakarta-Struts. Proto všechny třídy z tohoto balíku dědí třídu DispatcherAction. Tím zaručíme, že při použití konkrétní akce se automaticky volá metoda, která má stejný název, jako je hodnota proměnné „actionMethod“ posílané requestem. V případě, že v requestu není tato proměnná, dojde k volání metody *unspecified*. Výjimky jsou zapouzdřené ve třídě ActionException.

Balíček *beans* obsahuje jedinou třídu a to třídu Model.

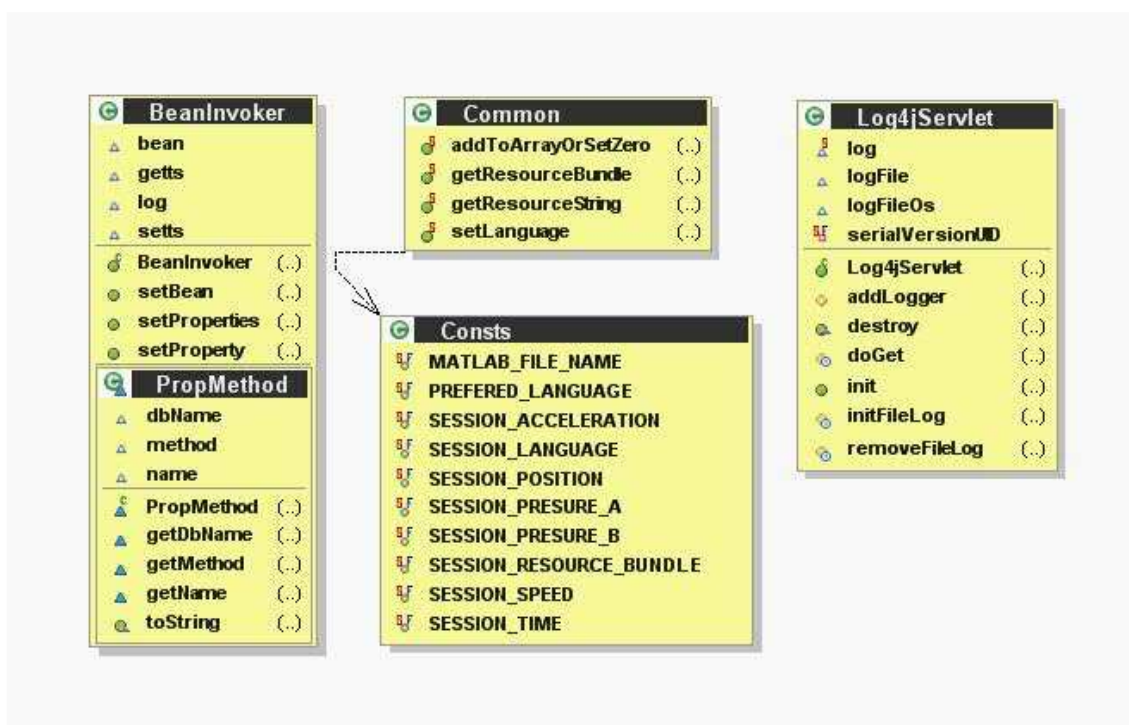


Obr. 6.4: Balík beans.

Jak je patrné z obrázku, tato třída má jedinou veřejnou metodu *startSimulation*. Ta se postará o provedení simulace a vrátí výsledky simulace. Spuštění vlastní simulace se pak provádí s využitím knihovny JMatLink. Pomocí privátní metody *setMatlabVariables* se nastavují hodnoty proměnných do workspace Matlabu.

Balíček *dto* obsahuje dvě třídy a to *SimulationParams* a *SimulationResult*. Jedná se o klasické dto (Data transfer object), takže neobsahují žádnou logiku, pouze atributy a příslušné get metody a set metody. Tyto objekty jsou nutné pro propojení akcí a třídy Model.

Poslední balíček obsahující třídy je balíček *util*. Obsahuje třídy zobrazené na obrázku Obr. 6.5.



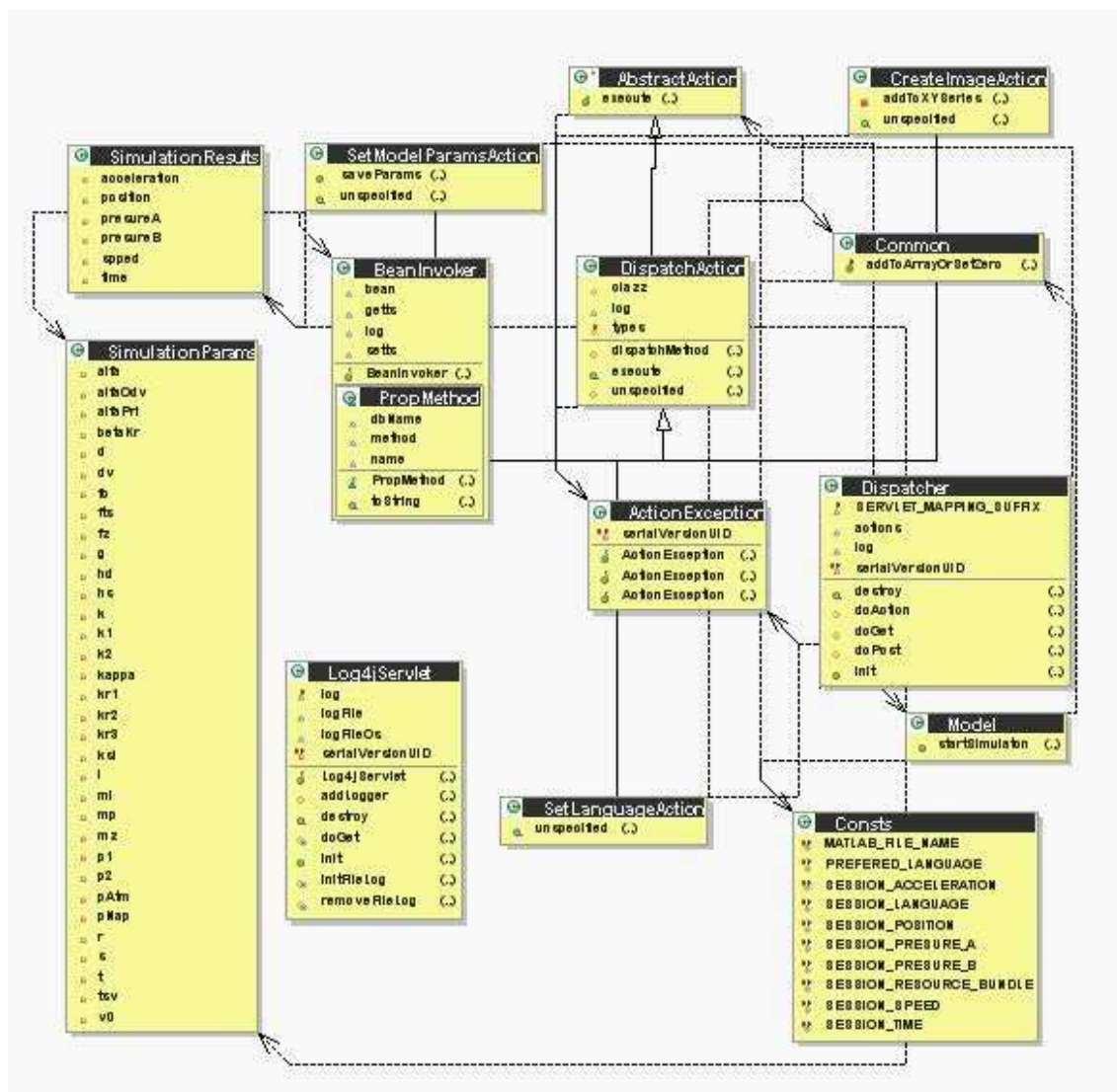
Obr. 6.5: Třídy balíku utils.

Třída *Log4jServlet* slouží k logování chybových hlášek aplikace. Třída *Common* má v sobě pomocné metody, bez výjimky statické. Za zmínku stojí, že se staré o zapouzdření volání metod třídy *ResourceBundle*, které řeší jazykové mutace. Dále je zde třída *BeanInvoker*, starající se o naplnění třídy *SimulationParams* z requestu. Poslední třída je *Consts*. Ta obsahuje finální, statické proměnné, tedy konstanty.

Poslední balíček *resources* obsahuje soubory, zahrnující texty pro jednotlivé jazykové mutace. Jak již bylo řečeno, o jazykové mutace se stará třída *ResourceBundle*, takže tyto texty musí být uloženy v ascii.



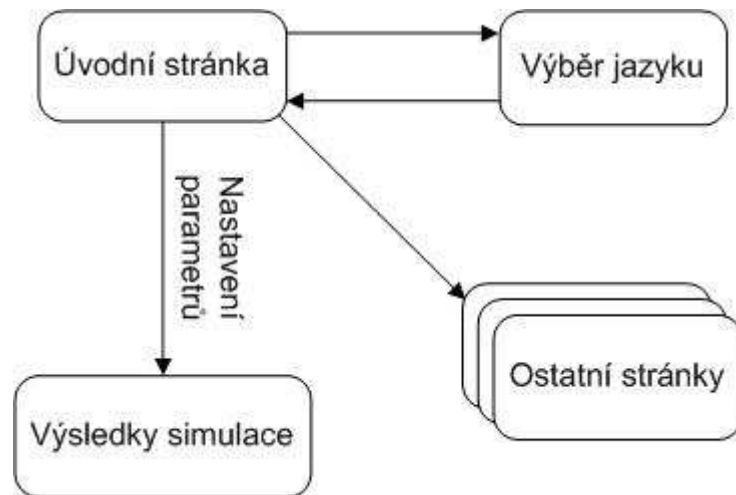
Relace mezi jednotlivými třídami z těchto balíčků jsou patrné z obrázku Obr. 6.6. Z důvodu přehlednosti jsou ovšem vypuštěny metody get a set.



Obr. 6.6: Relace mezi třídami balíčků aplikace.

### 6.1.2.3. Analytický model aplikace

Z pohledu uživatele se celá aplikace stává ze 4 hlavních částí odkazovaných v horním menu aplikace a několika dalších odkazů. Zjednodušenou strukturu lze vidět na obrázku Obr. 6.7: Struktura aplikace.



Obr. 6.7: Struktura aplikace

Výběr jazyku se realizuje kliknutím na příslušnou vlajku v pravé horní části aplikace. Dále následují 4 odkazy v horním menu (*úvod* – homepage, *popis modelu*, *simulace* a *návod k používání*). V pravé části obrazovky jsou další odkazy, týkající se aplikace a její architektury, definice web service v jazyce wsdl a potřebné dokumenty pro vytvoření klienta komunikujícího s aplikací přes web service.

Nejdůležitější částí je stránka pod odkazem *simulace*. Zde je v prvním kroku uživatel vyzván k zadání parametrů soustavy. Uživatel může hodnoty vyplnit dle vlastních požadavků, případně využít tlačítka v dolní části obrazovky a pomocí něho nastavit parametry soustavy řešené v této disertační práci. V případě změny parametrů, na kterých závisí parametry ostatní, dojde k automatickému přepočítání závislých parametrů (na straně klienta). Po kompletním a správném vyplnění všech hodnot, odešle uživatel formulář na server, a tím spustí vlastní simulaci. Správné a korektní vyplnění hodnot hlídá validace, která uživateli nedovolí v případě nesprávného vyplnění formulář odeslat. Snímky některých sejmutých obrazovek jsou v přílohách této práce (Příloha č.9).

Poslední důležitou částí aplikace je takzvaný SVG<sup>4</sup> modul zobrazující pomocí vektorové grafiky celý model vytvořený v toolboxu Simulink a jeho submodely. Uživatel může pomocí klikání myši celým modelem procházet a prohlížet uspořádání jednotlivých submodelů. Ukázku lze vidět v přílohách disertační práce (Příloha č.10).

<sup>4</sup> SVG (z anglického Scalable Vector Graphics) je značkový jazyk a formát souboru, který popisuje dvojrozměrnou vektorovou grafiku pomocí XML. Pro jeho zobrazení je potřeba mít ve webovém prohlížeči nainstalovaný ve webovém prohlížeči zásuvný modul, například od firmy Adobe.

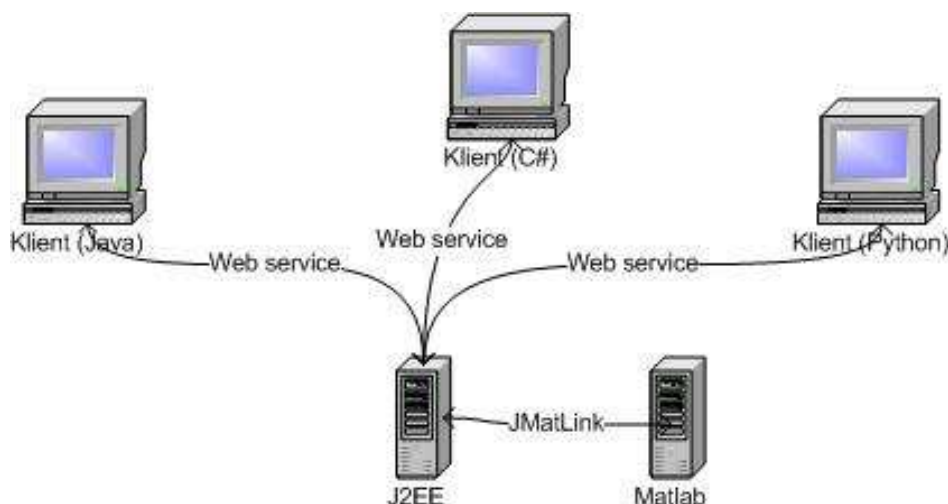
## 6.2. Webová služba (web service)

Webové služby jsou systém navržený pro podporu přenosu informací mezi počítači různých platforem. Jde tedy o obdobu technologií určených pro vzdálené volání funkcí v distribuovaných systémech jako CORBA či RMI. Na rozdíl od nich jsou však webové služby navrženy pro komunikaci mezi různými platformami (operačními systémy, programovacími jazyky, architekturami počítačů...).

Technologie webových služeb se je tvořena třemi částmi:

- protokolem pro vzdálené volání procedur;
- popisem poskytovaných služeb;
- mechanismy pro nalezení služeb.

Součástí disertační práce je i webová služba umožňující získání výstupních dat modelu v systémech různých platforem. Pro vlastní realizaci byla použita implementace protokolu SOAP (Simple Object Access Protocol) AXIS 1.4 vyvíjená společností The Apache Software Foundation. Vlastní popis webové služby ve formátu WSDL (Web Services Description Language) je vidět v příloze (Příloha č.8) a je také dostupný z pravého menu aplikace. Na základě tohoto popisu již není žádným problémem v případě potřeby vygenerovat klienta v libovolném jazyce jako například Java, C# či kupříkladu Python. Možné použití webové služby z jiných aplikací je schématicky znázorněno na obrázku Obr. 6.8.



Obr. 6.8: Schéma použití web service.

## 7. Závěr

V rámci disertační práce byly převzaty z lit. [12], [14], [15], [17] základní matematické rovnice popisující chování pneumatické lineární jednotky, pneumatického proporcionálního ventilu a regulátoru koncových poloh.

Z matematických rovnic byla sestavena obecná simulační schémata v programu Matlab 7.1, konkrétně v toolboxu Simulink. Obecnost simulačních schémat umožňuje použitelnost pro širokou škálu proporcionálních pneumatických ventilů a pneumatických lineárních jednotek. Simulační schémata obsahují velké množství parametrů, které je nutné určit pro konkrétní simulovaný pneumatický systém, mezi něž patří např. průměr pístu, maximální zdvih jednotky, průtoková charakteristika ventilu, atd.

Správnost odvozených rovnic a určených parametrů jednotlivých částí pneumatického systému v simulačním schématu byla ověřena měřením na reálném polohovém pneumatickém systému, složeného z komponent fy. Festo. Tento pneumatický systém je sestaven na Katedře sklářských strojů a robotiky. Jeho hlavní prvky jsou:

- bezpístnicová pneumatická lineární jednotka DGPL-32-500-A-KF-B;
- pneumatický proporcionální ventil MPYE-5-1/8-HF-010-B;
- regulátor koncových poloh SPC11.

Parametry potřebné k simulaci, byly vyhledány v technické dokumentaci jednotlivých komponent, případně změřeny. Mezi změřené parametry patřila třecí síla v jednotce DGPL. Veškerá měření byla prováděna pomocí Real Time Toolboxu a naměřená data byla dále zpracovávána v programu Matlab.

Na základě zjištěných parametrů byly provedeny simulace pneumatického systému v různých režimech a porovnaly se s měřením. Shoda simulace s měřením ukazuje správné zjištění velikostí parametrů regulátoru SPC11.

Sestavená simulační schémata jsou využitelná jak při studiu chování jednotlivých komponent pneumatického systému (ventil, lineární jednotka,...), tak i při studiu chování celých polohových systémů. Simulační schémata též usnadňují návrh řídicích systémů při volbě vhodných regulačních algoritmů.

Dále byla vytvořena webová aplikace v J2EE, které umožňuje provádět simulace, bez nutnosti instalace Matlabu na straně klienta. V kombinaci s vytvořeným SVG modulem, který umožňuje procházet celý model, včetně submodelů prostřednictvím www, lze tuto aplikaci využít při výuce předmětů oborového studia ASŘ. Následně byla vytvořena web service, umožňující využívat data vzniklá simulací v libovolných aplikacích nezávisle na operačním systému a použitým programovacím jazyku. Tato web service již byla úspěšně využívána v akademickém roce 2006/2007 při výuce předmětu Programovací techniky studijního oboru ASŘ-AIP.

Část získaných výsledků z měření a simulací již byly publikovány na 12. mezinárodní konferenci Sklářské stroje, konané v Liberci 19. a 20. září 2006 a mezinárodní konferenci Process Control, konané na Štrbském Plese 11. až 14. června 2007.

V průběhu prací na disertaci byla prováděna konzultace (e – mail) s pracovníky fy. Festo AG & Co. KG. Dotazy se týkaly většinou technických parametrů. Pracovníci firmy velmi neradi poskytovali další informace nad rámec firemních katalogů. Ne všechny požadované údaje se podařilo komunikací zjistit.

#### **Doporučení dalšího postupu:**

- zpřesnění matematického modelu lineární jednotky DGPL, vytvořením přesnějšího matematického modelu třecí síly v jednotce DGPL;
- při odvozování rovnic popisující termodynamické děje a v simulačním schématu zohlednit teplotu vzduchu uvnitř jednotky DGPL, oproti teplotě vzduchu okolí. V použitých rovnicích se bere teplota konstantní a stejná;
- zpřesnit matematický model regulátoru SPC11, doplněním o signálové filtry;
- vytvoření adaptivního řídicího systému;
- vytvořenou aplikaci včetně web service nasadit na veřejný server s garantovanou dostupností.

### **Uspořádání disertační práce:**

Pro přehlednost a návaznost jednotlivých kapitol nebylo možné striktně oddělit části s původními výsledky autora (částečně publikovanými na konferenci) a převzaté části.

Základní matematické odvození pneumatické lineární jednotky, pneumatického ventilu a regulátoru SPC11 je již dlouhodobě známé, zde bylo většinou využito pramenů z lit. [12], [14], [15] a rovnice byly upraveny pro potřeby simulace. Jako původní výsledky autora lze brát sestavené simulační schéma, jejichž správnost byla ověřena měřením, vytvoření modelu tření z naměřených dat a nalezení vhodných konstant regulátoru SPC11 použitelných v simulačním schématu. Dále vytvoření webové aplikace, příslušného SVG modulu a web service. Naměřená zdrojová data jsou k dispozici na CD, které je přiloženo k disertační práci. Jsou tam umístěny soubory se zdrojovými daty zde zobrazovaných grafů, tak i zdrojová data dalších grafů a závislostí, které nejsou z důvodu přehlednosti práce uváděny. Na CD jsou umístěny i zdrojové kódy aplikace, včetně všech náležitostí potřebných k nasazení aplikace na server.

## 8. Literatura

- [1] Pechoušek, J.: Základy programování v prostředí LabVIEW. Olomouc, UPA 2004
- [2] National Instruments, [online], National Instruments Corporation, URL: <http://www.ni.com>
- [3] Kalčík, J. – Sýkora, K.: Technická termodynamika. Praha, ACADEMICA 1973
- [4] Šinták, J.: Teoretické základy energetických zařízení. Liberec, VŠST 1988
- [5] Kříž, R. – Vávra, P.: Strojírenská příručka. Svazek 4., Praha, SCIENTIA 1994
- [6] Novák, J., P.: Plyny a plynné směsi. Praha, Academia 1972
- [7] Reid, R.,C. a kol.: Properties of Gases and Liquids. McGraw-Hill Companies 1987
- [8] Noskievič, P.: Modelování a identifikace systémů. Ostrava, MONTANEX 1999
- [9] Prokeš, J. – Vostrovský, J.: Hydraulické a pneumatické mechanismy. Praha, SNTL 1988
- [10] Al-Ibrahim, A., M. – Otis, D.,R.: Transient Air Temperature and Pressure Measurements During the Charging and Discharging Processes of an Actuating Pneumatic Cylinder, Proceedings of the 45 National Conference on Fluid Power, 1992
- [11] Urbásek, J.: Teoretické základy energetických zařízení. Tabulky a diagramy. VŠST 1985
- [12] Richter, E., Hurmuzulu, Y.: A high performance pneumatic force actuator system, Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control 2000
- [13] Doňar, B., Zaplatílek, K.: MATLAB – tvorba uživatelských aplikací. Praha, BEN 2004
- [14] Nevrlý, J.: Úvod do modelování pneumatických systémů. Praha, ČSVS 2003
- [15] Lü Yuan: Elektropneumatischer Positionierantrieb mit schnellen SchaltVentil, Disertaion, RWTH – Aachen 1992
- [16] Katalogy a manuály firmy Festo
- [17] Moučka, M.: Nelineární model pneumatického lineárního pohonu, Disertační práce, Liberec, 2004
- [18] Souček, P.: Servomechanismy ve výrobních strojích, Praha, ČVUT 2004

- [19] Šinták, J., Unger, J., Urbášek, J.: Teoretické základy energetických zařízení II., Liberec, VŠST 1988
- [20] Zítek, P.: Simulace dynamických systémů, Praha, SNTL, 1990
- [21] Hanselman, D., Littlefield, B.: Mastering Matlab 7, Prentice Hall, 2004
- [22] Uhlíř, F., Matička, R., Talácko, J., Balún, J., Lazorník, A.: Pneumatické obvody, České Budějovice, ČVUT 1997
- [23] Hanuš, B., Balda, M. a kol.: Základy technické kybernetiky, Liberec, Praha, 1989
- [24] Hanuš, B., Balátě, J., Švarc, I., Zikeš, F.: Teorie automatického řízení, Liberec, 1982
- [25] Olehla, M., Duřt, Z., Novák, V.: Simulace systémů, Liberec, 1987
- [26] Modrlák, O.: Úvod do identifikace, Liberec, 2004
- [27] Zahrobský, D., A. – Lewis, J.: Feedback Technologies for Pneumatic Cylinders, Proccendings of the 48<sup>th</sup> National Conference of Fluid Power, 2000
- [28] Bruce Eckel: Myslíme v jazyku Java, Praha, 2001
- [29] Schmuller, Joseph: Myslíme v jazyku UML, Praha, 2001



## 9. www odkazy

[www 1]      [www.festo.com](http://www.festo.com)

[www 2]      [www.smcworld.com](http://www.smcworld.com)

[www 3]      [www.automatizace.cz](http://www.automatizace.cz)

## 10. Publikace autora

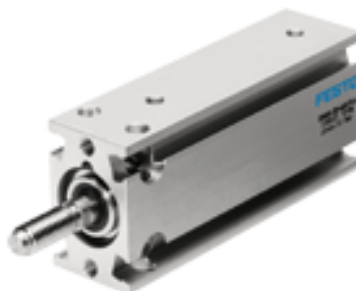
1. Motl, Z., Řezníček, D.: Mobile Internet – Wireless Application Protocol, RIP2004, ISBN 80-7194-662-1
2. Motl, Z.: Regulární výrazy v PHP 1, Svět IT, 2004, ISSN 1214-0082
3. Motl, Z.: Regulární výrazy v PHP 2, Svět IT, 2004, ISSN 1214-0082
4. Motl, Z.: Funkce pro práci s datem a časem, Svět IT, 2004, ISSN 1214-0082
5. Motl, Z.: Základy PHP - Pole, Svět IT, 2004, ISSN 1214-0082
6. Motl, Z.: Funkce pro třídění hodnot v poli, Svět IT, 2004, ISSN 1214-0082
7. Řezníček, D., Motl, Z.: Mobile web application with .NET, RIP2004, ISBN 80-7194-662-1
8. Motl, Z., Oliva, P.: Using of WAP for diagnostics and administration of servers platform Unix, Bratislava 2004, ISBN 80-2272106-9
9. Oliva, P., Motl, Z.: Slight turning of photovoltaic panels by date, Bratislava 2004, ISBN 80-2272106-9
10. Motl Z., Oliva P.: Using of Struts framework for Model-View-Control design, Bratislava, 2005, ISBN 80-227-2235-9
11. Oliva P., Motl Z.: Control of the photovoltaic panels by auxiliary panel, Bratislava, 2005, ISBN 80-227-2235-9
12. Oliva, P., Motl, Z.: The laboratory model of control of the photovoltaic panel by time, RIP2006, ISBN 80-7194-860-8
13. Motl, Z., Oliva, P., Moučka M.: Mathematic model of Pneumatic sytem, RIP2006, ISBN 80-7194-860-8
14. Motl, Z., Váša, J.: Měření třecí síly v přímočarých pneumatorech, Zlín, 2006, ISBN 80-7318-460-5
15. Váša, J., Motl, Z.: Prostorová datová struktura quad-stromu a její použití k indexaci prostorových objektů v GIS, Zlín, 2006, ISBN 80-7318-460-5

16. Lachman, M., Motl, Z., Horák, M.: Simulace a řízení servopneumatického polohovacího systému, Liberec, 2006, ISBN 80-7372-092-2
17. Lachman, M., Motl, Z., Horák, M.: Simulace a řízení servopneumatického polohovacího systému, Sklář a keramik, 2006, ISSN 0037-637X
18. Motl, Z., Novák, P.: Identification of linear actuator mechanism using Matlab, Process Control 07, 2007, ISBN 978-80-227-2677-1
19. Novák, P., Motl, Z.: Principles of sliding mode control, Process Control 07, 2007, ISBN 978-80-227-2677-1
20. Novák, P., Motl, Z.: Tracking control for basic nonlinear converters, Process Control 07, 2007, ISBN 978-80-227-2677-1
21. Motl, Z., Novák, P.: Pneumatical system response on step of external force, Process Control 07, 2007, ISBN 978-80-227-2677-1

## 11. Přílohy:

### 11.1. Příloha č.1

#### Přímočarý pohon DGPL-32-500-PPV-A-KF-B



Pokud je použit standardní zdvih pohonu pro pneumatické polohování, odpovídá pracovní zdvih cca 80% jmenovitého zdvihu.

charakteristika	Vlastnost
zdvih	10 - 3000 mm
průměr pístu	32 mm
tlumení	oboustranně nastavitelné tlumení (PPV)
montážní poloha	libovol.
vedení	kuličková oběžná pouzdra
princip unášeče	mechanický přenos síly (drážka)
snímání polohy	s přibližovacím čidlem
provozní tlak	2 - 8 bar
provozní režim	Dvojčinný
provozní médium	filtrovaný mazaný/nemazaný stlačený vzduch
třída odolnosti proti korozi KBK	0
okolní teplota	-10 - 60 °C

délka tlumení	20 mm
teoretická síla při 6 barech, zpětný chod	483 N
teoretická síla při 6 barech, dopředný chod	483 N
pohybující se hmotnost	580 g
pohybující se hmotnost při zdvihu 0 mm	580 g
základní hmotnost při zdvihu 0 mm	2720 g
nárůst hmotnosti na každých 10 mm zdvihu	69 g
alternativní připojení	viz výkres výrobku
připojení pneumatiky	G1/8
informace o materiálu víka	hliníkový odlitek, potažený
informace o materiálu těsnění	NBR, TPE-U(PU)
informace o materiálu pouzdra	hliník, eloxovaný

## 11.2. Příloha č.2

### Proporcionální průtokový ventil MPYE-5-1/8-HF-420-B



Charakteristika	Vlastnost
jmenovitá světlost	6 mm
typ upevnění	Elektrický
princip těsnění	Tvrký
montážní poloha	libovol.
konstrukce	pístové šoupě
typ návratu do původní polohy	magnetická pružina
bezpečnostní pokyny	Bezpečnostní poloha MPYE: Při přerušení napájecího kabelu dojde k najetí do uzavřené střední polohy.
typ řízení	Přímo
směr proudění	nelze obrátit
funkce ventilu	5/3, uzavřený
ochrana proti přepólování	pro požadovanou hodnotu
provozní tlak	0 - 10 bar
hodnota B	0,26
hodnota C	3,1 l/sbar

normální jmenovitý průtok	700 l/min
max. hystereze	0,4 %
rozsah provozního napětí DC	17 - 30 V
zbytkové zvlnění	5 %
požadovaná/skutečná hodnota	proud 4-20 mA
provozní médium	filtrovaný nemazaný stlačený vzduch, jemnost filtrace 5 µm
značka CE	ve shodě se směrnicí EU 89/336/EWG (EMV)
třída odolnosti proti korozi KBK	2
teplota média	5 - 40 °C
stupeň krytí	IP65
okolní teplota	0 - 50 °C
hmotnost výrobku	330 g
elektrické připojení	konektor, kulatý tvar, M12x1, 4 póly
typ upevnění	průchozí dírou
připojení pneumatiky 1	G1/8
připojení pneumatiky 2	G1/8
připojení pneumatiky 3	G1/8
připojení pneumatiky 4	G1/8
připojení pneumatiky 5	G1/8
informace o materiálu víka	ABS, potažený
informace o materiálu těsnění	NBR
informace o materiálu pouzdra	hliník, eloxovaný

### 11.3. Příloha č.3

#### Regulátor pohybu válce SPC11



charakteristika	Vlastnost
záloha dat	paměť flash
	vstup dálkové ovládání, učení se, doleva, doprava
řídící signály	vstup, pozice 1/2/3/4
	výstup, error-ready, pozice 1/2/3/4
zobrazení	3 místa, červená barva, sedmisegmentové zobrazení
ovládací prvky	3 tlačítka, fóliová klávesnice
jištění výstupů	elektronicky, prostřednictvím součtu všech výstupů, max. spouštěcí proud 500 mA
počet binárních výstupů	5
počet binárních vstupů	8
provedení výstupů	dle IEC 61131-2, pozitivní logika (PNP), bez galvanického oddělení
provedení vstupů	dle IEC 61131-2, pozitivní logika (PNP), bez galvanického oddělení



filtrace vstupů	20 ms
max. příkon s proporcionálním ventilem	1,1 A
max. příkon bez proporcionálního ventilu	70 mA
jmenovité provozní napětí DC	24 V
příkon vstupů	4 mA
zatížitelnost pro každý výstup	0,1 A
přípustné výkyvy napětí	+/- 25 %
vyzařování rušení	dle EN 61000-6-4 (průmysl.)
odolnost rušení	dle EN 61000-6-2
značka CE	ve shodě se směrnicí EU 89/336/EEG (EMV)
trvalá odolnost nárazu dle DIN/IEC 68 díl 2-82	zkoušeno v souladu se stupněm 1
relativní vlhkost vzduchu	0 - 95 %, nekondenzující
stupeň krytí	IP65, dle IEC 60529
odolnost vibracím dle DIN/IEC 68 část 2-6	zkoušeno v souladu se stupněm 1
okolní teplota	0 - 50 °C
hmotnost výrobku	400 g
elektrické připojení vícepólovým konektorem	15 pólů, SUB-D, konektor
elektrické připojení proporcionálního ventilu	se 7 póly
elektrické připojení odměřování	tvar A
délka kabelu	0,3 m

#### 11.4. Příloha č.4

##### Tlumič hluku UC-1/8



#### Charakteristika

montážní poloha

provozní tlak

provozní médium

hladina akustického tlaku

okolní teplota

hmotnost výrobku

připojení pneumatiky

informace o materiálu tlumicí vložky

informace o materiálu závitové části

#### Vlastnost

libovol.

0 - 10 bar

filtrovaný nemazaný stlačený vzduch

filtrovaný mazaný stlačený vzduch

59 dB(A)

-10 - 70 °C

1,9 g

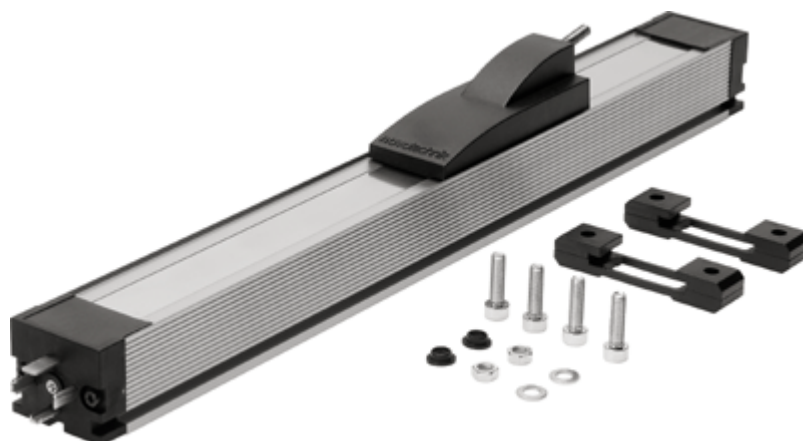
G1/8

PE

PE

## 11.5. Příloha č.5

### Odměřovací systém MLO-POT-750-TLF



#### Charakteristika

#### Vlastnost

Zdvih	750 mm
paralelní přesazení spojky	$\pm 1,5$ mm
úhlové přesazení unášече	$\pm 1$ °
montážní poloha	libovol.
princip odměřování	analog.
Konstrukce	s krycí páskou, s kluznými saněmi, otevřený profil
max. zrychlení pojezdu	200 m/s <sup>2</sup>
max. rychlost pojezdu	10 m/s
odpor připojení	10 kOhm
doporučený proud smyčky	$< 1$ $\mu$ A
max. provozní napětí DC	42 V
max. krátkodobý proud smyčky	10 mA

max. příkon	4 mA
jmenovité provozní napětí DC	10 V
tolerance zakončovacího odporu	20 %
přípustné výkyvy napětí	< 1 %
značka CE	ve shodě se směrnicí EU 89/336/EWG (EMV)
trvalá odolnost nárazu dle DIN/IEC 68 díl 2-82	zkoušeno v souladu se stupněm 1
stupeň krytí shora	dle IEC 60529
stupeň krytí zdola	dle IEC 60529
odolnost vibracím dle DIN/IEC 68 část 2-6	zkoušeno v souladu se stupněm 1
okolní teplota	-30 - 100 °C
hmotnost výrobku	1800 g
rozlišení délky	0,01 mm
výstupní signál	analog.
teplotní koeficient	5 ppm/K
nezávislá linearita	0,04 %
elektrické připojení	Konektor čtyřhranný tvar, dle DIN 43650, tvar A, 4 póly
informace o materiálu rozhraní saní	Ocel
informace o materiálu tělesa saní	hliníkový tlakový odlitek, plast
informace o materiálu krytu	Ocel
informace o materiálu montážních svorek	PEI
informace o materiálu víka	Plast
informace o materiálu pouzdra	hliník legovaný pro tváření, eloxovaný

## 11.6. Příloha č.6

### Redukční ventil s filtrem LFR-1/8-D-MINI



#### Charakteristika

Velikost

Řada

pojistka ovládání

montážní poloha

odpouštění kondenzátu

Konstrukce

max.množství kondenzátu

ochrana nádobky

#### Vlastnost

Mini

D

otočná hlavice s aretací

svisle +/- 5°

ručně otočný

redukční ventil s filtrem a manometrem

22 cm<sup>3</sup>

kovový ochranný koš

ukazatel tlaku	s manometrem
rozsah řízeného tlaku	0,5 - 12 bar
vstupní tlak 1	1 - 16 bar
max. tlaková hystereze	0,2 bar
normální jmenovitý průtok	750 l/min
provozní médium	stlačený vzduch
teplota média	-10 - 60 °C
okolní teplota	-10 - 60 °C
Povolení	Germanischer Lloyd
hmotnost výrobku	460 g
typ upevnění	dle volby: instalace vedení, příslušenstvím
připojení pneumatiky 1	G1/8
připojení pneumatiky 2	G1/8
informace o materiálu pouzdra	zinkový tlakový odlitek
informace o materiálu nádobky	PC

## 11.7. Příloha č.7

Výpis konfiguračního souboru webové aplikace – web.xml.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<!DOCTYPE web-app (View Source for full doctype...)>
= <web-app id="WebApp_ID">
  <display-name>matlab</display-name>
= <listener>
  <listener-
    class>org.apache.axis.transport.http.AxisHTTPSessionListener</listener-
    class>
  </listener>
= <servlet>
  <servlet-name>Dispatcher</servlet-name>
  <servlet-class>eu.motl.action.Dispatcher</servlet-class>
  </servlet>
= <servlet>
  <servlet-name>AxisServlet</servlet-name>
  <display-name>Apache-Axis Servlet</display-name>
  <servlet-class>org.apache.axis.transport.http.AxisServlet</servlet-class>
  </servlet>
= <servlet>
  <servlet-name>AdminServlet</servlet-name>
  <display-name>Axis Admin Servlet</display-name>
  <servlet-class>org.apache.axis.transport.http.AdminServlet</servlet-class>
  <load-on-startup>100</load-on-startup>
  </servlet>
= <servlet>
  <servlet-name>SOAPMonitorService</servlet-name>
  <display-name>SOAPMonitorService</display-name>
  <servlet-class>org.apache.axis.monitor.SOAPMonitorService</servlet-class>
= <init-param>
  <param-name>SOAPMonitorPort</param-name>
  <param-value>5001</param-value>
  </init-param>
  <load-on-startup>100</load-on-startup>
  </servlet>
= <servlet-mapping>
  <servlet-name>AxisServlet</servlet-name>
  <url-pattern>/servlet/AxisServlet</url-pattern>
  </servlet-mapping>
= <servlet-mapping>
  <servlet-name>AxisServlet</servlet-name>
  <url-pattern>*.jws</url-pattern>
  </servlet-mapping>
= <servlet-mapping>
  <servlet-name>AxisServlet</servlet-name>
  <url-pattern>/services/*</url-pattern>
  </servlet-mapping>
= <servlet-mapping>
```

```

    <servlet-name>SOAPMonitorService</servlet-name>
    <url-pattern>/SOAPMonitor</url-pattern>
    </servlet-mapping>
- <servlet-mapping>
    <servlet-name>AdminServlet</servlet-name>
    <url-pattern>/servlet/AdminServlet</url-pattern>
    </servlet-mapping>
- <servlet-mapping>
    <servlet-name>Dispatcher</servlet-name>
    <url-pattern>*.action</url-pattern>
    </servlet-mapping>
- <session-config>
    <session-timeout>5</session-timeout>
    </session-config>
- <mime-mapping>
    <extension>wsdl</extension>
    <mime-type>text/xml</mime-type>
    </mime-mapping>
- <mime-mapping>
    <extension>xsd</extension>
    <mime-type>text/xml</mime-type>
    </mime-mapping>
- <welcome-file-list>
    <welcome-file>index.jsp</welcome-file>
    </welcome-file-list>
</web-app>

```



## 11.8. Příloha č.8

Definice vytvořené web service.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
= <wsdl:definitions
    targetNamespace="http://localhost:9080/matlab/services/Model"
    xmlns:apacheSOAP="http://xml.apache.org/xml-soap"
    xmlns:impl="http://localhost:9080/matlab/services/Model"
    xmlns:intf="http://localhost:9080/matlab/services/Model"
    xmlns:soapenc="http://schemas.xmlsoap.org/soap/encoding/"
    xmlns:tns1="urn:SimulationParams" xmlns:tns2="urn:SimulationResults"
    xmlns:wsdl="http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/"
    xmlns:wsdlsoap="http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/soap/"
    xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
    = <!--
        WSDL created by Apache Axis version: 1.4
        Built on Apr 22, 2006 (06:55:48 PDT)
    -->
= <wsdl:types>
= <schema targetNamespace="urn:SimulationParams"
    xmlns="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
    <import namespace="urn:SimulationResults" />
    <import namespace="http://localhost:9080/matlab/services/Model" />
    <import namespace="http://schemas.xmlsoap.org/soap/encoding/" />
= <complexType name="SimulationParams">
= <sequence>
    <element name="PAtm" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="PNap" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="alfa" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="alfaOdv" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="alfaPri" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="betaKr" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="d" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="dv" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="fc" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="fts" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="fz" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="g" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="hd" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="hs" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="k" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="k1" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="k2" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="kappa" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="kr1" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="kr2" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="kr3" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="ksi" nillable="true" type="xsd:double" />
    <element name="l" nillable="true" type="xsd:double" />
```

```

<element name="mi" nillable="true" type="xsd:double" />
<element name="mp" nillable="true" type="xsd:double" />
<element name="mz" nillable="true" type="xsd:double" />
<element name="p1" nillable="true" type="xsd:double" />
<element name="p2" nillable="true" type="xsd:double" />
<element name="r" nillable="true" type="xsd:double" />
<element name="s" nillable="true" type="xsd:double" />
<element name="t" nillable="true" type="xsd:double" />
<element name="tsv" nillable="true" type="xsd:double" />
<element name="v0" nillable="true" type="xsd:double" />
</sequence>
</complexType>
</schema>
= <schema targetNamespace="http://localhost:9080/matlab/services/Model"
  xmlns="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <import namespace="urn:SimulationResults" />
  <import namespace="urn:SimulationParams" />
  <import namespace="http://schemas.xmlsoap.org/soap/encoding/" />
  = <complexType name="ArrayOf_xsd_anyType">
  = <complexContent>
  = <restriction base="soapenc:Array">
  = <attribute ref="soapenc:arrayType" wsdl:arrayType="xsd:anyType[]" />
  </restriction>
  </complexContent>
  </complexType>
  </schema>
= <schema targetNamespace="urn:SimulationResults"
  xmlns="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <import namespace="http://localhost:9080/matlab/services/Model" />
  <import namespace="urn:SimulationParams" />
  <import namespace="http://schemas.xmlsoap.org/soap/encoding/" />
  = <complexType name="SimulationResults">
  = <sequence>
  = <element name="acceleration" nillable="true"
    type="impl:ArrayOf_xsd_anyType" />
  <element name="position" nillable="true" type="impl:ArrayOf_xsd_anyType" />
  <element name="pressureA" nillable="true" type="impl:ArrayOf_xsd_anyType"
    />
  <element name="pressureB" nillable="true" type="impl:ArrayOf_xsd_anyType"
    />
  <element name="spped" nillable="true" type="impl:ArrayOf_xsd_anyType" />
  <element name="time" nillable="true" type="impl:ArrayOf_xsd_anyType" />
  </sequence>
  </complexType>
  </schema>
  </wsdl:types>
= <wsdl:message name="startSimulatonResponse">
= <wsdl:part name="startSimulatonReturn" type="tns2:SimulationResults" />
  </wsdl:message>
= <wsdl:message name="startSimulatonRequest">
= <wsdl:part name="simulationParams" type="tns1:SimulationParams" />
  </wsdl:message>

```

```

= <wsdl:portType name="Model">
= <wsdl:operation name="startSimulaton" parameterOrder="simulationParams">
= <wsdl:input message="impl:startSimulatonRequest"
  name="startSimulatonRequest" />
  <wsdl:output message="impl:startSimulatonResponse"
    name="startSimulatonResponse" />
  </wsdl:operation>
</wsdl:portType>
= <wsdl:binding name="ModelSoapBinding" type="impl:Model">
  <wsdlsoap:binding style="rpc"
    transport="http://schemas.xmlsoap.org/soap/http" />
= <wsdl:operation name="startSimulaton">
= <wsdlsoap:operation soapAction="" />
= <wsdl:input name="startSimulatonRequest">
  <wsdlsoap:body encodingStyle="http://schemas.xmlsoap.org/soap/encoding/"
    namespace="http://beans.motl.eu" use="encoded" />
  </wsdl:input>
= <wsdl:output name="startSimulatonResponse">
  <wsdlsoap:body encodingStyle="http://schemas.xmlsoap.org/soap/encoding/"
    namespace="http://localhost:9080/matlab/services/Model" use="encoded"
    />
  </wsdl:output>
  </wsdl:operation>
</wsdl:binding>
= <wsdl:service name="ModelService">
= <wsdl:port binding="impl:ModelSoapBinding" name="Model">
  <wsdlsoap:address location="http://localhost:9080/matlab/services/Model" />
  </wsdl:port>
</wsdl:service>
</wsdl:definitions>

```

## 11.9. Příloha č.9

## Snímek obrazovky aplikace - zadávání parametrů modelu

Nastavení parametrů modelu - Microsoft Internet Explorer provided by gedas

Soubor Úpravy Zobrazit Oblíbené Nástroje Nápočítá

Zpět ↩ Znovu ↺ Hledat 🔍 Oblíbené ⭐

Adresa http://localhost:9080/matlab/setModelParams.action

## Simulace chování pneumatické soustavy

Úvod Popis soustavy Simulace Návod

**Model**

SVG modul  
Download SVG viewer

**Web service**

Popis rozhraní  
Dokumentace  
Download AXIS 1.4

**Lineární pneumatická jednotka DGPL**

**Tření**

$D$  0.032 [m]  
 $S$  0.000804247719424 [m³]  
 $m_p$  0.6 [kg]  
 $L$  0.500 [m]  
 $V_0$  0.0000064 [m³]

**Vlastnosti plynu**

$r$  287 [J.kg⁻¹.K⁻¹]  
 $\kappa$  1.4 [-]  
 $T$  293.15 [K]

**Pneumatický ventil MPYE**

$\mu$  1 [-]  
 $\beta_{lv}$  0.5283 [-]  
 $K_2$  0.1562 [-]  
 $K_1$  0.0404 [-]  
 $D_v$  0.0110 [m]  
 $h_s$  0.0030 [m]  
 $h_a$  0.0024 [m]  
 $P_1$  0.0003  
 $P_2$  0.0027  
 $T_v$  0.0016 [K]  
 $\xi$  0.6 [-]

**Konstanty**

$K$  1 [-]  
 $KR1$  25 [-]  
 $KR2$  -0.7 [-]  
 $KR3$  -0.01 [-]

Spustit simulaci

Nastavit parametry podle dis práce

**Konstanty do tlakových rovnic**

$\alpha_{pri}$  1.4 [-]  
 $\alpha_{ode}$  1 [-]  
 $\alpha$  1.2 [-]

**Tlaky vzduchu**

$P_{map}$  200000 [Pa]  
 $P_{atm}$  100000 [Pa]

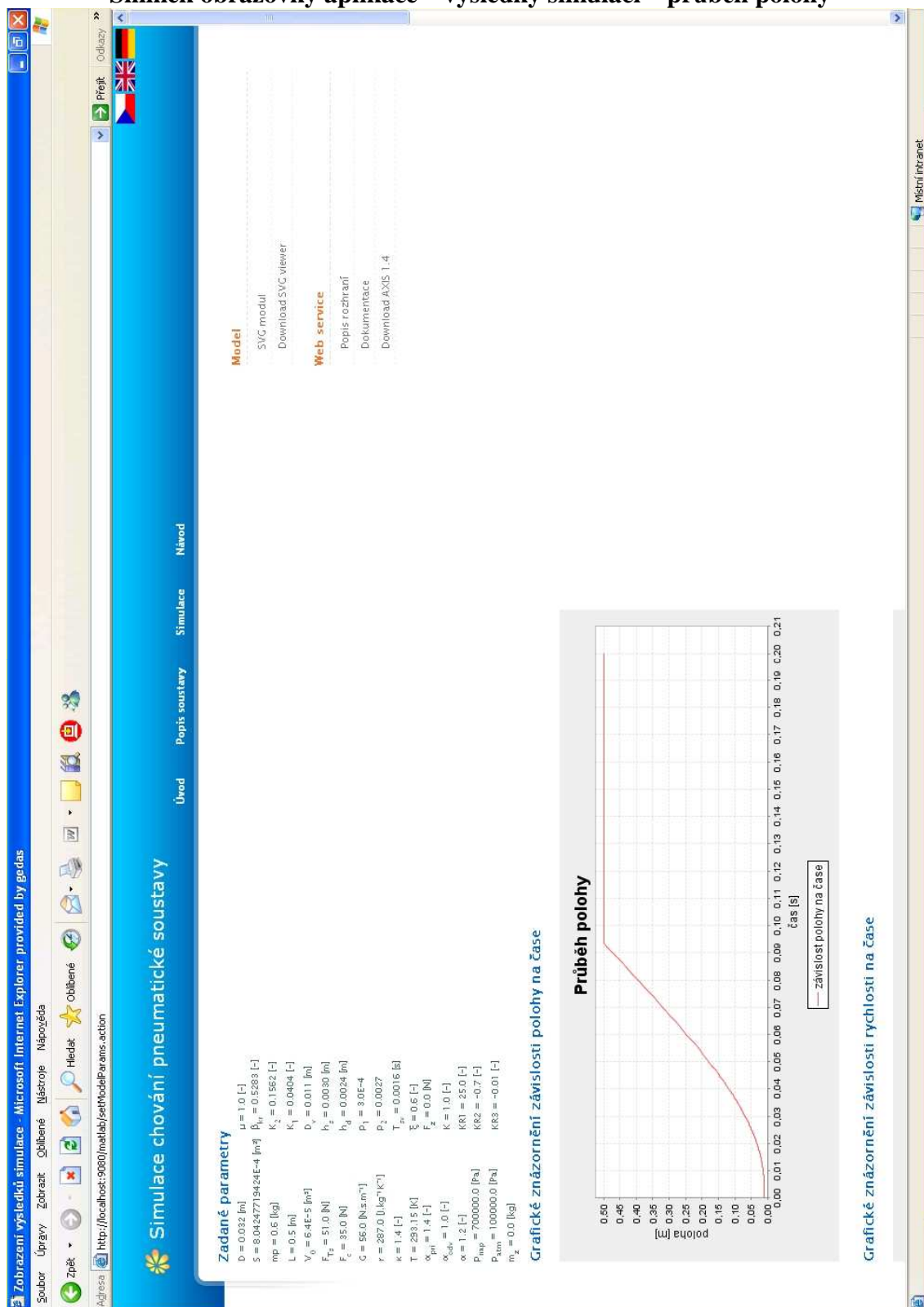
**Hmotnost zátěže**

$m_z$  0 [kg]

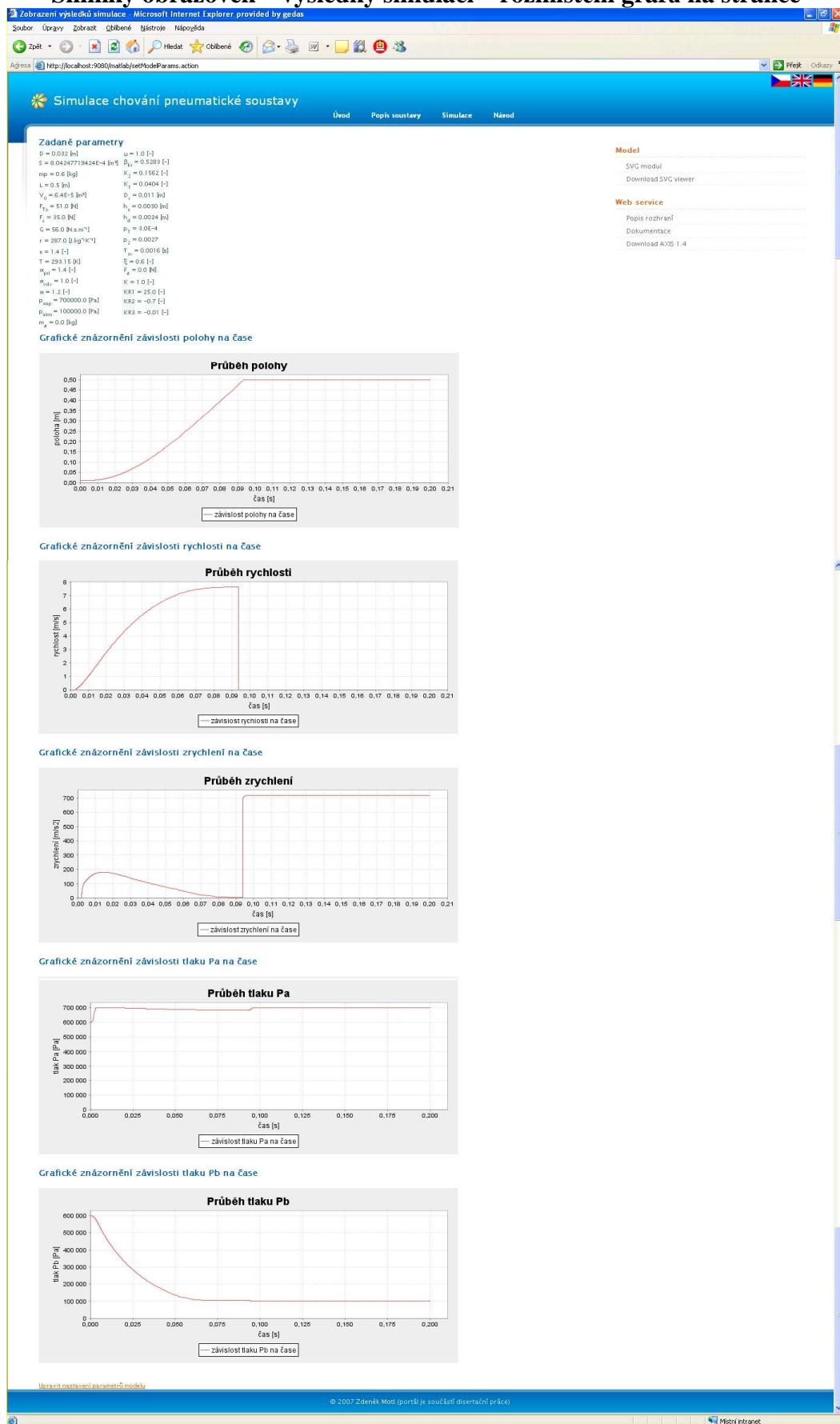
**Externí zátěžná síla**

$F_z$  0 [N]

Snímek obrazovky aplikace – výsledky simulací – průběh polohy



## Snímky obrazovek – výsledky simulací – rozmístění grafů na stránce



## 11.10. Příloha č.10

Model soustavy prezentovaný ve www browseru za použití SVG Viewer

